



TU Clausthal

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 2/33

Saskia Müller

Charakterisierung einer formschlüssi-
gen Hybrid- Verbindung aus faserver-
stärktem Kunststoff und Aluminium

Professor Dr.- Ing. Dieter Meiners

Institut für Polymerwerkstoffe
und Kunststofftechnik

Charakterisierung einer formschlüssigen Hybrid- Verbindung aus faserverstärktem Kunststoff und Aluminium

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Saskia Müller
aus Weener

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
13.10.2020

Dekan

Prof. Dr.- Ing. Karl-Heinz Spitzer

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof.- Dr.- Ing. habil. Joachim Deubener

Hauptberichterstatter

Prof. Dr.- Ing. Dieter Meiners

Berichterstatter

Prof. Dr.- Ing. Heinz Palkowski

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die bei der Fakultät für Material- und Naturwissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereichte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst und die benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben habe.

Clausthal- Zellerfeld, den 10.07.2020

"Twenty years from now you will be more disappointed by the things that you didn't do than by the ones you did do. So throw off the bowlines. Sail away from the safe harbor. Catch the trade winds in your sails. Explore. Dream. Discover."
- Mark Twain

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2014 bis 2020 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der Technischen Universität Clausthal. Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und der Möglichkeit zur Promotion. Herrn Prof. Dr.-Ing. Palkowski danke ich, da er mich als zweiter Gutachter betreut hat. Weiterer Dank gilt aktuellen, wie auch ehemaligen Kollegen am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik. Insbesondere Stefanie Goldau, Andrea Scholten, Katarzyna Kapustka, Sebastian Sdrenka, Randolf Hoffmann, Grigori Oehl, Tobias Fischer und Dilmurat Abliz. Besonders möchte ich auch den Kollegen der Werkstatt (des Technikums) danken, die immer versucht haben meine spontanen und manchmal auch verrückten Ideen umzusetzen.

Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig bedanken, insbesondere bei Michael Brandt für die gute Zusammenarbeit. Nach meinem Autounfall musste er im Projekt viel auffangen.

Ich möchte mich natürlich auch bei meinen Studenten bedanken. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt hier dem besten Hiwi- Team der Welt: Thomas Traufetter, Julian Kusche, Mona Stoll, Steffi Seidel und Till Wolfram.

Außerdem möchte ich mich bei der Firma ECKOLD GmbH & Co. KG bedanken. Dieter Rus und Uwe Kutzmutz haben für mich mehrere tausend Strukturen in meine Bleche strukturiert. Vielen Dank für die Geduld.

Ein großer Dank geht an meine Freunde und Familie. Ohne euer Verständnis und eure Anschübe wäre diese Arbeit nie fertig geworden.

Last but not least möchte ich mich bei dem besten Freund der Welt bedanken: Steffen. Du bist mein Fels in der Brandung.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Untersuchung und Bewertung einer innovativen formschlüssigen Hybridverbindung aus faserverstärktem Kunststoff und Aluminium.

Aus Gründen der Emission- und Treibstoffkostenreduzierung wird die Gewichtsreduktion der eingesetzten Werkstoffe im Automotive-sektor immer wichtiger. Hierfür eignen sich Leichtmetalle wie Aluminium, aber auch Kunststoffe. Durch die Kombination beider Werkstoffe bietet sich ein neues Leichtbaupotenzial. Um Werkstoffpaarungen nach ihrer Lebensdauer getrennt voneinander dem Recycling zuführen zu können, stellen formschlüssige Verbindungen eine gute Möglichkeit dar. In dieser Arbeit geht es um die Charakterisierung und Optimierung dieser Hybridverbindung aus kohlenstoff- bzw. glasfaserverstärktem Duromer mit einer Aluminiumlegierung. Die Metallseite wird mittels Kaltumformprozess und eines Hohlkegelwerkzeuges bearbeitet, sodass Strukturen aufgeworfen werden. Hinter diesen Strukturen werden die technischen Fasern abgelegt und anschließend mittels VARI Verfahren mit einem Harzsystem infudiert. Eine schematische Zeichnung einer fertiggestellten Probe ist in Abbildung 1 dargestellt.

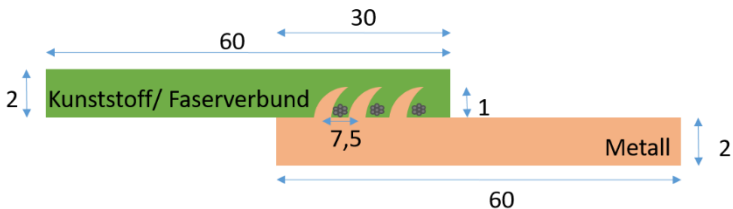


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Hybridverbindung, Abmaße in mm

Zur Analyse wurden die Zug- und Biegeeigenschaften sowie die Energiefreisetzungsraten der Hybridproben gemessen und mit den Einzelkomponenten bzw. einem Optimierungsansatz verglichen. Um das Potenzial der gefertigten Proben beurteilen zu können, wurden ebenfalls die theoretisch maximal erreichbaren Kräfte mittels der

klassischen Laminattheorie berechnet. Eine Handlungsempfehlung zur Erstellung der formschlüssigen Hybridverbindung runden die Arbeit ab.

Abstract

This thesis deals with the investigation and evaluation of an innovative interlocking hybrid connection of fibre-reinforced plastic and aluminum. For reasons of emission and fuel cost reduction, weight reduction of the materials used in the automotive sector is becoming more and more important. Light metals such as aluminum and plastics are suitable for this purpose. The combination of both materials offers a new potential for lightweight construction. In order to be able to recycle material pairs separately after their service life, interlocking connections are a good possibility. This thesis deals with the characterization and optimization of this hybrid compound of carbon- or glass-fibre reinforced thermosets with an aluminum alloy. The metal beads are machined by cold forming and a hollow cone tool so that structures are raised. Behind these structures, the technical fibres are deposited and then infused with a resin system using the VARI process. A schematic drawing of a finished sample is shown in figure 1.

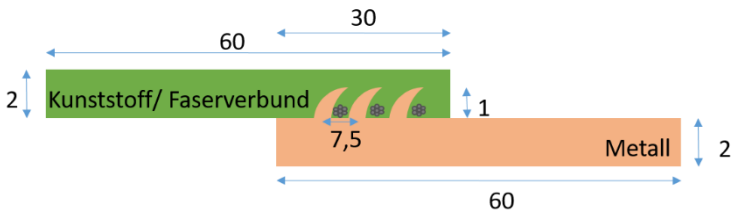


Figure 1: Schematic representation of the interlocking hybrid connection, dimensions in mm

For analysis, the tensile and bending properties as well as the energy release rates of the hybrid samples were measured and compared with the individual components or an optimization approach. In order to assess the potential of the manufactured samples, the maximum theoretically achievable forces were also calculated using classical laminate theory. A recommended course of action for the creation of the positive hybrid connection completes the work.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Ziel	1
2	Einleitung und aktueller Stand	5
2.1	Werkstoffeigenschaften	5
2.1.1	Metalle und ihre Eigenschaften	5
2.1.2	Aluminium	9
2.1.3	Kunststoffe und ihre Eigenschaften	10
2.1.4	Hybride	13
2.2	Stand der Technik hybrider Verbindungen	17
2.2.1	Beispiel Mehrschichtverbundrohr	18
2.2.2	Beispiel GLARE (GLAssfibre REinforced Aluminum)	19
2.3	Stand der Wissenschaft; Übersicht	20
2.4	Stand der Forschung hybrider, formschlüssiger Verbindungen, ausgewählte Arbeiten	23
2.4.1	Formschlüssige Verbindungen	23
2.4.2	Kraftschlüssige Verbindungen	33
2.4.3	Stoffschlüssige Verbindung (Adhäsion)	35
2.5	Zusammenfassung und Einordnung der neuen Hybridverbindung	38
3	Probenherstellung und –analyse	40
3.1	Herstellung der Hybridverbindungen	40
3.1.1	Metallkomponente	41
3.1.2	Kunststoffkomponente	45
3.2	Prüfverfahren	52
3.2.1	Zug-/ Scherprüfung	53
3.2.2	Dreipunktbiegung	57
3.2.3	Interlaminare Energiefreisetzungsrate (G_{IC})	59
3.2.4	Faservolumengehalt	63
3.2.5	Mikroskopische Analyse der Verbindungsqualität	64

3.3	Referenzverbindungen	65
4	Experimentelle Untersuchungen: Ergebnisse und Auswertung	66
4.1	Zugversuch.....	69
4.1.1	Grundlegende Untersuchungen	69
4.1.2	Referenzverbindungen	73
4.1.3	Vergleich der getesteten Serien	80
4.1.4	Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel Zug	93
4.2	Dreipunktbiegung	101
4.2.1	Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel Biegung	105
4.3	Energiefreisetzungsrates	109
4.3.1	Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel G_{1C}	111
4.4	Mikroskopische Auswertung	115
4.4.1	Reproduzierbarkeit der Metallstrukturen	118
4.5	Faservolumengehalt.....	120
4.6	Vergleich der maximalen Spannungen	121
4.7	Zusammenfassung.....	124
4.8	Interpretation der Ergebnisse am Beispiel CFK.....	126
4.8.1	Optimierung Sandstrahlen.....	130
5	Handlungsempfehlung und Optimierung	134
5.1	Handlungsempfehlung zur Herstellung dieser innovativen Hybridverbindung	134
5.2	Optimierung.....	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	140
6.1	Zusammenfassung.....	140
6.2	Ausblick	142
7	Verzeichnisse	145
7.1	Literaturverzeichnis	145

7.2	Abbildungsverzeichnis	151
7.3	Tabellenverzeichnis	157
8	Anhang	158
8.1	Datenblatt Entenkopf	158
8.2	Montageanleitung HiLok	165
8.3	Kohlenstofffasern	166
8.4	Glasfasern	167
8.5	Harzsystem	168
8.6	Faservolumengehalt	169
8.7	Vermessung einer Struktur	170
8.8	Berechnung der maximal übertragbaren Kraft mittels klassischer Laminat- theorie und Tsai Wu Kriterium (72) .	171
9	Lebenslauf:	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
Alu	Aluminium
B	Bor
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CMT	Cold Metal Transfer Technology
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
E	Elastizitätsmodul
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GF	Glasfaser
GF40	Glasfaserverstärkung von 40 %
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	GLAssfibre REinforce aluminum
GMT	Glasfasermattenverstärktes Thermoplasthalbzeug
GMT (Organoblech)	GlasfaserMattenverstärktes Thermoplasthalbzeug
HC420LA	Stahlsorte
MLI	Multi Layer Inserts
PA6	Polyamid 6
PA6.6	Polyamid 6.6
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
Si	Silicium
T _G	Glasübergangstemperatur
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
a	Risslänge	mm
A_{tot}	Energie	J
E_{11}	E-Modul 0°	MPa
E_{22}	E-Modul 90°	MPa
F	Kraft	MPa
G_{12}	Schubmodul	MPa
G_{1C}	Rate	J/m ²
m	Masse	g
V_f	Faservolumenanteil	%
w	Breite der Probe	mm
ν_{12}	Querkontraktionszahl 0°	-
ν_{21}	Querkontraktionszahl 90°	-
ρ	Dichte	g/cm ³
ϕ	Volumenanteil	%
γ	Verzerrung	-
σ	Spannung	MPa
τ	Schubspannung	MPa
ϵ	Dehnung	-

1 Motivation und Ziel

Die Bundesregierung will die Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 40 % gegenüber dem Jahr 1990 senken. Deutschland strebt an, bis zur Mitte des Jahrhunderts weitgehend treibhausgasneutral zu werden. Dazu wurde ein Klimaschutzplan bis 2050 erstellt. (1)

Für das Jahr 2016 wurden Gesamtemissionen in Höhe von 909 Mio. t berichtet, die zweite Steigerung in Folge. Daher ist für Deutschland die Reduktion der CO₂-Emissionen zentral, um die Verpflichtungen zum Klimaschutz zu erfüllen. (2)

Hauptursache der CO₂-Entstehung ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Diese Brennstoffe werden in vielen Prozessen eingesetzt, zum Beispiel bei der Wärme- und Stromerzeugung oder im Mobilitätssektor. Der Personenkraftwagen-Verkehr (PKW) ist für ca. 12 % der gesamten CO₂-Emissionen in der EU verantwortlich. Laut der EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von PKW, die im April 2009 formell verabschiedet wurde, dürfen Neuwagen der PKW- Flotte eines Unternehmens ab 2020 durchschnittlich nur 95 g CO₂ pro Kilometer ausstoßen. Der aktuelle Grenzwert liegt bei 130 g/km. (3)

Die Reduktion von CO₂-Emissionen und der nachhaltige Umgang mit den zur Verfügung stehenden Umweltressourcen sind daher Herausforderungen, die auch den Mobilitätssektor betreffen. Um die Ziele zu erreichen, gibt es z.B. für Automobilhersteller mehrere Lösungsansätze. Unter anderem können Reibungsverluste minimiert und der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors optimiert werden. Hierbei stoßen Entwickler jedoch immer häufiger an die physikalischen und thermodynamischen Grenzen. Der nächste Innovationssprung liegt daher in der Reduktion der bewegten Masse bzw. in der Umsetzung unterschiedlicher Leichtbaulösungen. Ziel des Leichtbaus ist es daher, aus ökonomischen oder funktionalen Gründen, das Gewicht zu verringern, ohne die Tragfähigkeit, Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion lastoptimiert zu reduzieren. Hierbei wird vor

allein an neuen Werkstoffkonzepten und Fertigungsverfahren geforscht, um z.B. die positiven Leichtbaueigenschaften von Faserverbundmaterialien in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen nutzbar zu machen. Ein leichteres Fahrzeug braucht weniger Antriebskraft, um dieselbe Beschleunigung zu erreichen, dadurch kann eine signifikante Kraftstoffreduzierung, bzw. CO₂-Emissionsreduktion, erreicht werden. Auch im Bereich der E-Mobilität, deren Akzeptanz maßgeblich von der Reichweitenproblematik abhängig ist, bieten Leichtbauanwendungen die Schlüsseltechnologie zur Umsetzung der ambitionierten Ziele aus dem technologischen und umwelttechnischen Bereich.

Insbesondere der Einsatz hybrider Bauteile aus Metall und Faserverbundkunststoffen (FVK) besitzt in diesem Kontext ein hohes Leichtbaupotenzial. Durch die spezielle Materialkombination können die spezifischen positiven Eigenschaften der jeweiligen Werkstoffe gezielt in einem Bauteil genutzt und die negativen kompensiert werden.

Die Entwicklung und industrielle Umsetzung von Multi-Material-Konzepten unter Verwendung von Leichtbauwerkstoffen ist in vielen Industriezweigen von Großunternehmen bis hin zu kleinen und mittelständischen Betrieben ein wirtschaftlich sehr bedeutendes Entwicklungsfeld.

In vielen Technologiebereichen besteht die zukünftige Herausforderung in der Entwicklung neuer Leichtbauwerkstoffe, die bei einer weiteren Gewichtseinsparung gegenüber den heutigen Konzepten eine gesteigerte Leistungsaufnahme aufweisen und sich zudem wirtschaftlich in größeren Stückzahlen herstellen lassen. In Deutschland ist neben der Luftfahrtindustrie die Automobilbranche sehr an neuen Leichtbaulösungen interessiert. Hier geht deutlich der Trend von monolithischen Bauweisen über Mischbauweisen aus Stahl und Aluminium bis hin zu hybriden Ansätzen aus Kunststoff und Metall. Leichtbauwerkstoffe wie Leichtmetalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe verdrängen zunehmend konventionellen Stahl, der damit seine dominierende Rolle verliert (Abbildung 1).

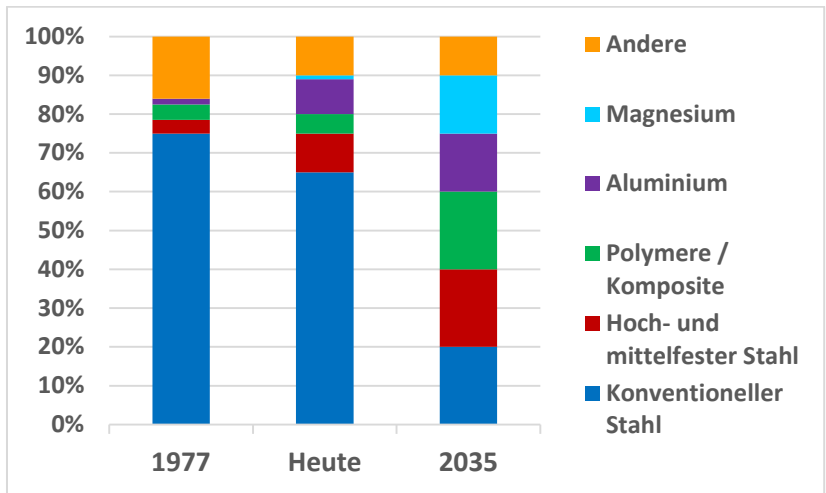


Abbildung 2: Materialzusammensetzung eines Pkw im zeitlichen Vergleich. (4)

Eine der größten Herausforderungen bei hybriden Bauteilansätzen ist hierbei die Gewährleistung der materiellen Verbindung im Bereich der Materialgrenzflächen. In diesem Kopplungsbereich muss die Kraftübertragung des einen Werkstoffpartners in den anderen sichergestellt werden. Die unterschiedlichen spezifischen Materialeigenschaften, wie z.B. Elastizitätsmodul oder Zugfestigkeit, führen dazu, dass konventionelle Verbindungsverfahren, wie Clinchen, nicht ohne weiteres für die Materialkombination Metall-FVK eingesetzt werden können. In zahlreichen Forschungsarbeiten werden daher für unterschiedliche Anwendungsfälle Ansätze aus Hybridverbindungen mittels Stoff-, Kraft- und Formschluss entwickelt und analysiert.

In diesem Kontext wurde diese Dissertation angefertigt, innerhalb derer ein mechanischer Verklammerungseffekt charakterisiert wurde, der auf Formschluss zwischen Metall und FVK beruht. Diese Hybridverbindung wurde mittels ausgewählter mechanischer Analysemethoden getestet. Desweiteren wurde die Verbindung mit der klassischen Laminattheorie berechnet. Die berechneten Werte wurden mit

den gemessenen Werten verglichen und somit die formschlüssige Verbindung bewertet.

Damit diese neuartige Hybridverbindung in der industriellen Herstellung Anwendung finden kann, wird aus den Erkenntnissen der Analysen eine Handlungsempfehlung zur Herstellung hybrider Bauteile erstellt. Diese Empfehlung berücksichtigt eine lastpfadgerechte Auslegung.

2 Einleitung und aktueller Stand

2.1 Werkstoffeigenschaften

Im Folgenden werden grundsätzliche Eigenschaften von Metallen und Kunststoffen aufgezeigt. Außerdem wird die Materialwahl für die hier verwendete Hybridverbindung definiert.

2.1.1 Metalle und ihre Eigenschaften

Zunächst werden die grundsätzlichen Eigenschaften von Metallen dargestellt.

2.1.1.1 Allgemeine Eigenschaften

Metallische Werkstoffe sind kristallin aufgebaut, sie besitzen ein periodisches Gitter mit einer Fernordnung. Sie zeichnen sich im Allgemeinen durch hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, duktilen Verhalten und Verformbarkeit, auch bei tiefen Temperaturen, sowie Reflexionsfähigkeit für Licht aus. Einige Metalle zeigen auch magnetisches Verhalten oder Supraleitung. (5)

Durch die teils großen Bindungskräfte sind Schmelztemperaturen um die 1000 °C begründet. Die guten mechanischen Eigenschaften sind einerseits durch die Bindungskräfte (metallische Bindung) und durch vorhandene Gitterfehler im Realkristall begründet (6). Durch die Gitterfehler wird einerseits die Gitterenergie, und folglich die Festigkeit, erhöht (Einlagerung von Fremdatomen). Andererseits ist durch das Vorhandensein von Versetzungen das Metall plastisch verformbar (Gleitprozesse). Metalle reagieren zum Teil stark mit Sauerstoff und Säuren. Es wird zwischen edlen und unedlen Metallen unterschieden. Aluminium reagiert wie Eisen bzw. Stahl mit Sauerstoff, bildet jedoch eine stabile Oxidschicht aus, die das Grundmaterial vor weiterer Korrosion schützt. (7)

Speziell für die in dieser Arbeit neu entwickelte Hybridverbindung ist es wichtig, dass die Metallseite plastisch verformbar und weniger spröde ist. Daher wurde auf eine Aluminiumlegierung zurückgegriffen, die Magnesium statt Zink enthält. Daher wird in dieser Arbeit

AlCuMg1-2017 verwendet. Außerdem gehört es zu den sogenannten Leichtmetallen, die schon grundsätzlich für Leichtbaulösungen verwendet werden. Zu den Leichtmetallen gehören alle Elemente mit einer Dichte von $\leq 4,5 \text{ g/cm}^3$. In der Industrie werden vor allem Legierungen auf Basis von Aluminium (ca. $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$), Titan (ca. $\rho = 4,5 \text{ g/cm}^3$) und Magnesium (ca. $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$) verwendet. (8) Die hier verwendete Legierung hat eine Dichte von $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$.

Um eine kurze Übersicht über das metallische Verhalten zu geben, wird im Folgenden auf die elektrische Leitfähigkeit und das Kristallisationsverhalten kurz eingegangen.

2.1.1.2 Elektrische Leitfähigkeit

Insbesondere die elektrische Leitfähigkeit und der negative Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes liegen darin begründet, dass die äußeren Energiebänder bei metallischen Leitern immer nur teilweise mit Elektronen besetzt sind. Dies unterscheidet sie von Isolatoren, bei welchen alle Bänder vollständig besetzt oder vollständig unbesetzt sind.

Bei Leitern überlappen sich Leitungsband und Valenzband, im Gegensatz zu Halbleitern und Isolatoren, bei welchen zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband ein Bereich unerlaubten Energieniveaus liegt (9).

Der negative Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes wird dadurch begründet, dass die Beweglichkeit der Elektronen stärker durch thermische Schwingungen verringert wird, als die Menge der beweglichen Elektronen im äußersten Energieband durch thermische Energie erhöht wird, wie es bei Halbleitern der Fall ist (siehe Abbildung 3). (5)

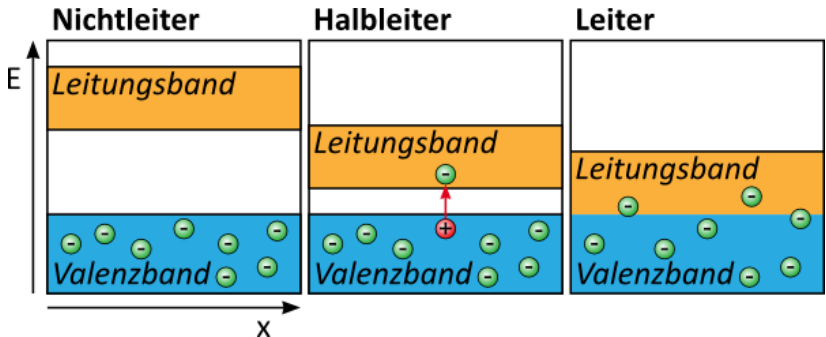
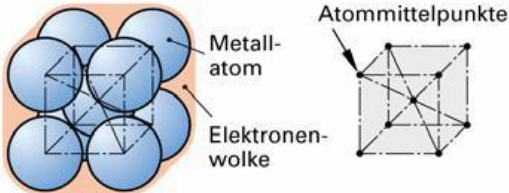
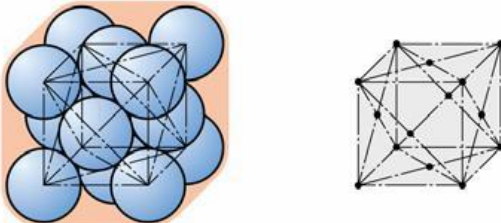
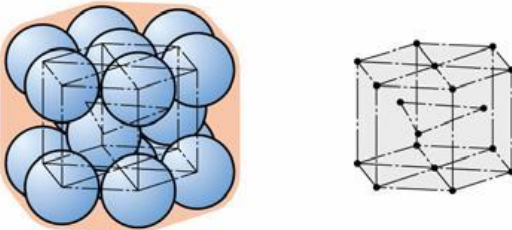


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Bändermodells, welches die elektrische Leitfähigkeit von Metallen beschreibt (9)

2.1.1.3 Kristallisationsverhalten

Metalle streben in ihrem Kristallisationsverhalten nach der größten möglichen Packungsdichte der Atome. Aus diesem Grund kristallisieren etwa zwei Drittel aller metallischen Werkstoffe in kubisch-flächenzentrierter oder hexagonal-dichtgepackter Struktur, in welchen eine Packungsdichte von 74% erreichbar ist. Die dichtest gepackte Ebene in diesen Strukturen erreicht sogar eine Packungsdichte von 91% (10).

Metalle kristallisieren aber auch in anderen Strukturen, wie zum Beispiel Diamantstruktur, kubisch-raumzentrierter oder kubisch-primitiver Struktur.

**Kugelmodell-
Darstellung****Strichmodell-
Darstellung****kubisch raumzentriertes Kristallgitter (krz)****kubisch flächenzentriertes Kristallgitter (kfz)****hexagonales Kristallgitter (hex)****Abbildung 4:**Typische Kristallstrukturen der Metalle (11)**2.1.1.4 Korrosionsverhalten**

Die meisten Metalle sind unbeständig gegenüber Sauerstoff und Wasser in ihrer Umgebung und reagieren mit diesen zu Oxid- oder Hydroxidschichten. Die Reaktivität ist größer, je unedler das Metall ist, jedoch bilden insbesondere unedle Metalle wie Aluminium und

Magnesium dadurch sehr schnell Passivierungsschichten aus, welche eine weitere Korrosion des Metalls verhindern (5).

Eine weitere Ursache von Korrosion bei Metallen ist die elektrochemische Potenzialdifferenz zwischen Metallen. Sind zwei Metalle mit unterschiedlichem elektrochemischem Potenzial in einer Elektrolytlösung leitend miteinander verbunden, so wird das unedlere Metall ionisiert und geht in Lösung.

2.1.2 Aluminium

Aluminium ist ein Leichtmetall, das weit verbreitet Anwendung findet. Es kristallisiert im Allgemeinen in einer kubisch-flächenzentrierten Struktur (12).

Reinaluminium hat eine Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ und einen E-Modul von 70 GPa, die Zugfestigkeit beträgt zwischen 60 und 90 MPa abhängig vom Reinheitsgrad, bei einigen Legierungen, wie Hartaluminiumlegierungen, kann sie jedoch bis zu 500 MPa betragen (13).

In manchen Legierungen ist Aluminium durch Ausscheidung spröder Phasen aushärtbar, wodurch seine mechanischen Eigenschaften stark verbessert werden. Es ist weiterhin sehr gut umformbar und weist eine gute Zerspanbarkeit auf (13).

Aluminium hat ein Normalpotenzial von $-1,66 \text{ V}$ und gehört damit zu den unedlen Metallen. Bei Kontakt mit Sauerstoff bildet es sofort eine Passivierungsschicht, welche weitere Korrosion verhindert, jedoch die Schweißbarkeit verschlechtert (12).

Auf die Eigenschaften der hier verwendeten Aluminiumlegierung AlCuMg1-2017 wird in Kapitel 4.1.2.1.1 näher eingegangen.

2.1.3 Kunststoffe und ihre Eigenschaften

Kunststoffe sind, wie der Name schon verrät, künstlich synthetisierte Materialien. Exakter ist der Ausdruck Polymere. Ein Großteil der Kunststoffe basiert auf Erdöl. Um Ressourcen zu schonen, gibt es Bemühungen vorhandene Kunststoffe zu recyceln oder biologisch abbaubare Kunststoffe zu verwenden.

Polymere bestehen aus Makromolekülen, die als lineare oder verzweigte Ketten vorliegen. Die Makromoleküle entstehen aus den kleinsten gleichartigen Baueinheiten, den Monomeren. Polymere werden durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition gebildet (14).

Kunststoffe lassen sich in drei Klassen einteilen. Jede dieser Klassen weist andere Struktur und damit Eigenschaften auf. Es lässt sich zwischen den Thermoplasten, den Elastomeren und den Duromeren unterscheiden (siehe Abbildung 5).

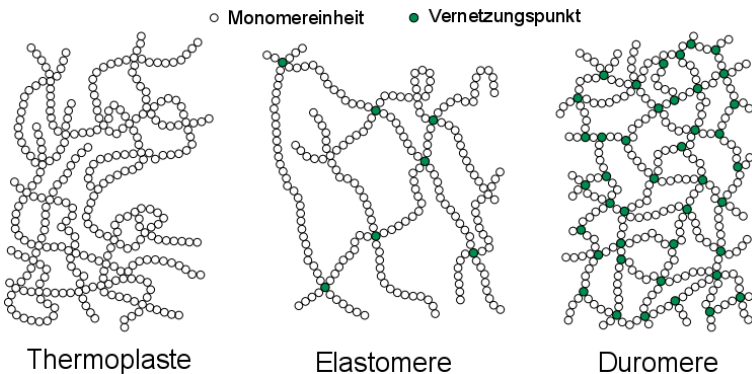


Abbildung 5: Schematischer molekularer Aufbau von Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren nach (15)

Thermoplaste bestehen aus langen linear bis leicht verzweigt vorliegenden Kohlenstoffketten. Je nachdem wie diese Ketten vorliegen, lässt sich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten unterscheiden. Bei den amorphen Thermoplasten liegen die Molekülketten ungeordnet, bei den teilkristallinen Thermoplasten in Teilen lamellar vor. Aufgrund der chemischen Struktur sind Thermoplaste

schmelzbar und löslich. Sie lassen sich oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G bzw. des Schmelzpunktes thermo-plastisch verformen.

Elastomere bilden die zweite Kunststoffklasse. Die Makromoleküle sind teilweise über Hauptvalenzkräfte miteinander vernetzt. Sie sind formfest und lassen sich bei Raumtemperatur elastisch verformen. Dies ist durch den niedrigen T_G (unterhalb der Raumtemperatur) begründet. Aufgrund der Vernetzung sind Elastomere nicht schmelzbar, jedoch quellbar. Sie sind daher schwierig zu recyceln.

Die Duomere bilden die dritte Kunststoffklasse. Die Makromoleküle sind über Hauptvalenzkräfte stark untereinander vernetzt. Im Idealfall entsteht bei dieser Reaktion nur ein Makromolekül, in dem alle Ketten miteinander vernetzt sind. Der T_G liegt oft oberhalb der Zersetzungstemperatur, sodass ein Erweichen nicht möglich ist. Daher sind Duomere weder schmelzbar noch löslich. Nach der Vernetzungsreaktion der Monomere liegen die Duomere hart und wenig duktil vor. Eine weitere Formgebung ist nur durch ein spanendes Verfahren möglich (14).

Die chemischen und mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen lassen sich über die funktionellen Nebengruppen und die Ausbildung von Nebervalenzkräften stark beeinflussen. Die meisten Polymere sind elektrische Isolatoren. Die Dichte der Polymere ist über ein breites Spektrum möglich (von festen Materialien bis hin zu hoch expandierenden Schäumen). Anders als bei den Metallen, lässt sich der Schmelzpunkt, je nach vorliegender Molekülstruktur, über ein breites Maß einstellen (16).

Im Vergleich mit anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Metallen, weisen Kunststoffe relativ geringe Festigkeiten und Steifigkeiten auf (17). Diese Materialkenngrößen können durch Zugabe von Fasern in den Kunststoff deutlich gesteigert werden. Eine solche Faserverstärkung wird in allen drei Kunststoffklassen praktiziert. Faserverstärkte Kunststoffe sind beispielsweise kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK, carbonfaserverstärkte Kunststoffe), die meistens mit duro-

meren Kunststoffen hergestellt werden. Andere Beispiele sind Autoreifen, die mittels eines Stahlgewebes verstärkt werden. Sowie so genannte Wood-Plastic-Composites. Diese werden aus Holzfasern und einem Thermoplast hergestellt und zum Beispiel für Fußbodenbelag genutzt.

Bei den faserverstärkten Kunststoffen (FVK, **faserverstärkte Kunststoffe**) gibt es immer zwei Komponenten, die verschiedene Aufgaben haben: die Fasern und die Matrix. Die Fasern besitzen eine weitaus höhere Steifigkeit als die Matrix und leiten die Kräfte in Faserrichtung. In dem Verbund übernimmt die Matrix entscheidende Aufgaben und beeinflusst so maßgeblich die Effizienz des Verbundes. Sie fixiert die Fasern und sorgt für eine geometrische Anordnung. Darüber hinaus leitet sie die wirkenden äußeren Kräfte in den Verbund und verteilt diese zwischen den einzelnen Fasern. Kräfte, die nicht in Faserrichtung wirken, werden von ihr aufgenommen, vor allem Schubbeanspruchungen. Bei Druckkräften in Faserrichtung stützt sie diese. Matrixsysteme schützen die oft empfindlichen Fasern vor äußeren Umwelteinflüssen z.B. mechanischem Abrieb, Chemikalien und energetischer Strahlung.

Viele physikalische Eigenschaften des Verbundes werden maßgeblich von ihr beeinflusst: Dichte, Kriech- und Relaxationsverhalten, Wärmeleitfähigkeit, thermische Ausdehnung und Temperaturbeständigkeit.

Die Verstärkungsfasern nehmen die Zugkräfte auf und erhöhen so die mechanischen Eigenschaften des Verbundes, jedoch können diese nur begrenzt Biegemomente und Druckkräfte aufnehmen. Eine optimale Anbindung von Fasern an die Matrix bewirkt die mechanische Verstärkung an definierten Stellen oder in definierte Richtungen.

Wie groß die Verstärkungswirkung ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen ist die Faserrichtung entscheidend, denn Fasern können die Kräfte nur optimal in Faserrichtung übertragen.

Sollen Kräfte in mehrere Richtungen übertragen werden, müssen die Fasern in diese Richtungen ausgerichtet sein. Zum anderen sind die mechanischen Eigenschaften von Faser und Matrix ausschlaggebend. Sie lassen sich an Hand der Mischungsregel des Elastizitätsmoduls E abschätzen. Dabei werden die Eigenschaften der Einzelkomponenten sowie der jeweilige Volumenanteil φ in der folgenden Formel miteinbezogen:

$$E_{\text{ges}} = \varphi_{\text{Faser}} \cdot E_{\text{Faser}} + \varphi_{\text{Matrix}} \cdot E_{\text{Matrix}}$$

Des Weiteren ist das Verhältnis von Faserdurchmesser zu Faserlänge wichtig. Je kürzer und dicker die Faser wird, desto schlechter wird die relative Kraftübertragung. Außerdem kann eine optimale Kraftübertragung von Matrix zu Faser nur gewährleistet werden, wenn die beiden Komponenten aneinanderhaften bzw. miteinander wechselwirken. Im besten Fall geschieht dies durch eine kovalente Anbindung, kann aber auch durch Nebenvalenzkräfte realisiert werden. Dies wird durch eine Art Impregnierung mittels Schlichte realisiert.

Erst ein Zusammenschluss beider Materialien mit einer optimalen Anbindung von Faser und Matrix bewirkt die mechanische Verstärkung an definierten Stellen oder in definierte Richtungen. Faserverbundkunststoffe besitzen aufgrund ihres niedrigen Gewichts eine sehr gute spezifische Festigkeit (18).

Es kommen prinzipiell alle drei Kunststoffklassen (Duromere, Thermoplaste und Elastomere) als Matrixsysteme in Betracht.

Die Verstärkungsfasern müssen vor allem die, an dem Bauteil von außen wirkenden, Kräfte aufnehmen. Dazu müssen sie entsprechend hohe Werte für die Steifigkeit und Festigkeit besitzen. Zudem sollten sie eine möglichst geringe Dichte im Sinne des Leichtbaus aufweisen. Vor allem Fasern aus den Elementen C, B, Si weisen diese Eigenschaften auf (19).

2.1.4 Hybride

Grundsätzlich bestehen Hybride aus mehreren Fügepartnern. In dieser Arbeit werden Hybridverbindungen aus zwei verschiedenen

Werkstoffen charakterisiert. Im Folgenden werden Hybride und ihr Nutzen näher erläutert.

2.1.4.1 Was sind Hybridwerkstoffe?

Hybridwerkstoffe sind Werkstoffe, die aus mehreren Komponenten verschiedener Werkstoffgruppen gebildet werden, wie z.B. beschichtetes Holz bei Arbeitsplatten oder Mehrschichtverbundrohr im Installationsbereich aus Polyethylen und Aluminium.

Sie werden typischerweise im Schichtverbund aus mindestens zwei Werkstoffen verschiedener Hauptgruppen gefertigt (20).

Die Verbindung der Materialien bzw. Durchmischung geschieht auf mikroskopischem Niveau (anders als bei Verbundwerkstoffen, die gepresst, geklebt oder verschweißt werden). Die Eigenschaften lassen sich nicht einfach durch Linearkombinationen beschreiben, da die Phasendurchmischung großflächig auf mikroskopischer Ebene geschieht. Vor allem die Oberflächeneigenschaften der anwesenden Phasen ändern sich stark (21).

Wenn beispielsweise die in dem Verbund verarbeiteten Kohlenstofffasern im direkten Kontakt mit der unedleren Aluminiumlegierung stehen und es dadurch zu einer Elektronenabgabe kommen kann, hat dies eine galvanische Korrosion der Al-Legierung zur Folge (22). Versuche nach der Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 haben bei der Firma RANDOLID Thiel GmbH gezeigt, dass ungeschützte Proben korrodierten (rechte Seite in Abbildung 6) im Vergleich zu den geschützten Proben auf der linken Seite (23).



Abbildung 6: Probe der Firma RADOLID Thiel GmbH nach Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 **(23)**. Auf der rechten Probenseite ist deutlich Korrosion zu erkennen.

Faserverbundbauteile sollten immer direkt untereinander verbunden werden und nicht mit einer Metallkomponente. Sollte dies jedoch notwendig sein, ist es ratsam, zwischen der CFK-Struktur und einigen Metallen, wie z.B. Aluminium, einige Lagen GFK-Lagen zu legen. Zusätzlich kann die Verbindung durch Lacke oder Dichtungen geschützt werden.

Im Allgemeinen weisen Faserverbundstrukturen jedoch eine weitaus größere Resistenz gegenüber Korrosion als Metalle auf (24).

2.1.4.2 Warum Hybridverbindungen?

Hybridverbindungen werden immer dann als Lösung eingesetzt, wenn die positiven Eigenschaften beider Fügepartner hervorgehoben werden sollen oder wenn eine negative Eigenschaft durch einen anderen Werkstoff kompensiert werden soll.

Optimalerweise überträgt die Hybridverbindung größere Kräfte als das zu ersetzende Material und hat dabei eine geringere Dichte. So können im Mobilitätssektor der Kraftstoffverbrauch gesenkt, dadurch die Emissionen verringert und die Kosten minimiert werden. In diesem Fall wurden Hybride ausgewählt um einen Leichtbauwerkstoff zu entwickeln, der im Mobilitätssektor Anwendung finden kann. Hier sollen sowohl gute Eigenschaften des Metalls, wie z.B. Fügefähigkeit und Umformbarkeit, mit den leichten und guten kraftübertragenden Eigenschaften des FVK kombiniert werden. Dabei wird besonderer Wert auf gute Anbindung der beiden Werkstoffe gelegt.

Um die Werkstoffeigenschaften der Hybridverbindung beurteilen zu können, werden diese mit Referenzverbindungen verglichen. Dabei handelt es sich sowohl um die monolithischen Materialien als auch um ein industriell eingesetztes Fügeverfahren von Metall und FVK, dem Nieten.

In dieser Arbeit wird die Hybridverbindung mit faserverstärkten Kunststoffen hergestellt. Um eine maximale Kraftübertragung gewährleisten zu können, wurden technische Fasern verwendet. Um sowohl steife Fasern mit hohem E-Modul und etwas flexiblere Fasern mit niedrigerem E-Modul vergleichen zu können, kamen Kohlenstoff- und Glasfasern zum Einsatz. Für eine möglichst flexible Gestaltung bei der Faserdrapierung wurde ein unidirektionales Gelege mit einem Gesamtflächengewicht von 600 g/m² (Glasfasern, HP-U600E-10) und 500 g/m² (Kohlenstofffasern, HP-U500/123C-10) der Firma HP-TeXtles ausgewählt. Als Matrix dient ein Infusionsharzsystem RIMR 135 der Firma Hexion. Die Datenblätter befinden sich in Anhang 8.3 - 8.5. Dabei handelt es sich um ein modifiziertes Epoxidharzsystem auf Bisphenol A Basis mit passendem Härter und Beschleuniger. Durch die guten mechanischen Eigenschaften eignet sich dieses System zur Herstellung von statisch und dynamisch hochbelasteten Bauteilen.

2.2 Stand der Technik hybrider Verbindungen

Seit einigen Jahren gibt es nun schon die Herausforderung, monolithische Verbindungen durch hybride Werkstoffe zu ersetzen. Im Rahmen des VDMA-Leitfadens „Hybride Leichtbau Technologien“ (25) entstand eine Übersicht für aktuelle Fertigungs- und Fügeverfahren hybrider Werkstoffe. In diesem Leitfaden geht es um das Urformen, Umformen, Schweißen, Löten und Kleben. Da dieser Leitfaden sehr übersichtlich ist, wird an dieser Stelle darauf verwiesen und der Inhalt nicht wiedergegeben.

Grundsätzlich ist es eine große Herausforderung, die Verbindung zwischen den Fügepartnern sicher zu stellen. Konventionelle Techniken monolithischer Bauweisen, bzw. Fertigungen können oftmals nur sehr aufwendig auf hybride Werkstoffverbindungen angepasst werden. Für die Weiterentwicklung der hybriden Strukturen sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in jedem einzelnen Teilgebiet erforderlich. Im Folgenden wird kurz auf zwei grundsätzliche Prozessrouten zur Herstellung hybrider Bauteile eingegangen. Hybride, wie in diesem Fall aus Metall und Faserverbundmaterialien, können mittels zwei unterschiedlicher Fertigungsprozesse hergestellt werden. Zum einen gibt es mehrstufige Verfahren, bei denen der Verbund durch Füge- und Montageoperationen erzeugt wird und zum anderen gibt es die prozessintegrierte Hybridbauteilherstellung. Die Wahl für eine der beiden grundsätzlichen Prozessrouten hängt vom jeweiligen Anwendungsfall, der technischen Eignung, sowie von der Verfügbarkeit bzw. den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Auch eine Kombination beider Prozessrouten ist denkbar (26).

Die hier vorgestellte Arbeit beschäftigt sich mit der prozessintegrativen Herstellung und charakterisiert im Wesentlichen die Hybridverbindung in Bezug auf spezifische Kenngrößen wie Kraftübertragung, Energiefreisetzung und qualitativer Bewertung des Formschlusses.

Der materielle Zusammenhalt im Bereich der Materialgrenzflächen der jeweiligen Verbundpartner limitiert oft die Leistungsfähigkeit von

hybriden Bauteilstrukturen. Sowohl vom einen als auch vom anderen Fügepartner muss die Kraft optimal übertragen werden können. Des Weiteren müssen weitere Effekte, wie z.B. die anisotropen Materialeigenschaften der FVK-Komponente, unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, unterschiedliche Elastizitätsmodule und die deutlich unterschiedlichen Schmelz- und Einsatztemperaturen, berücksichtigt werden. Zur Herstellung des Metall-Kunststoff-Hybrids können unterschiedliche Verbindungsarten genutzt werden. Diese werden in Kraftschluss, Stoffschluss und Formschluss unterschieden.

Im Folgenden werden nun die hybriden Werkstoffkombinationen aus dem Bereich der formschlüssigen Verbindungsverfahren vorgestellt.

2.2.1 Beispiel Mehrschichtverbundrohr

Das Mehrschichtverbundrohr besteht aus einem Außenrohr und einem Innenrohr aus Polyethylen. Dazwischen ist mit jeweils einer Haftschrift ein Aluminiumrohr platziert.



Abbildung 7: Schema des Mehrschichtverbundrohres (27)

Diese Rohre werden bei Installationsarbeiten, z.B. im Heizungsbau oder Sanitärbereich, als wasserführende Leitung benutzt. Es ist leicht zu biegen und durch die Aluminiumzwischenschicht, siehe Abbildung 7, auch sauerstoffundurchlässig. Seit 2008 sind diese Rohre auch als gasführende Leitungen zugelassen (27).

2.2.2 Beispiel GLARE (GLAssfibre REinforced Aluminum)

Fasermetalllaminat gelten wegen ihrer höheren Ermüdungsbeständigkeit und geringeren Dichte im Vergleich zu monolithischen Aluminiumblechen als fortschrittliche Luft- und Raumfahrtstrukturen. Die mögliche Gewichtsreduktion von 20% für Flugzeugstrukturen war der Haupttreiber hinter der Entwicklung dieses Werkstoffverbundes. Im Rumpf vom Airbus A380 werden zum Beispiel 793 m² Glasfaser-Aluminium-Laminat verbaut, das so genannte GLARE. Dieser Werkstoffverbund besteht aus einzelnen, alternierend aufgebauten Glasfaser-/Metallschichten, siehe Abbildung 8.

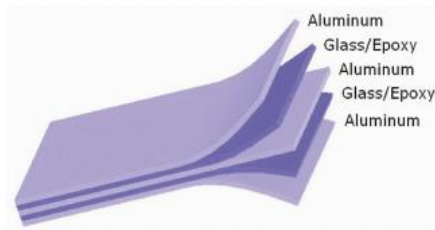


Abbildung 8: Aufbau GLARE (28)

GLARE verbessert die mechanischen Eigenschaften des Flugzeugrumpfes im Vergleich zum monolithischen Aluminium und reduziert die Flugzeugmasse des A 380 um 8 t (28). Das entspricht ca. 1,5 % des ursprünglichen Gewichtes.

2.3 Stand der Wissenschaft; Übersicht

Eine Übersicht über den Stand der Wissenschaft in Bezug auf hybride Verbindungen mittels Adhäsion, Formschluss und Kraftschluss gibt die Tabelle 1. In Kapitel 2.4 werden ausgesuchte Veröffentlichungen aus dem Stand der Forschung vorgestellt. Anschließend wird im Kapitel 2.5 die hier charakterisierte Verbindung in diesen Kontext eingeordnet.

Tabelle 1: Übersicht über den Stand der Wissenschaft

	Autoren	Quellen	Ausgangsmaterialien	Fokus auf	Besonderheiten	Abgrenzung zur vorliegenden Arbeit
1	M. Grujicic, V. Sellappan, G. Arakere and J.M. Ochterbeck	(29)	Glasfaserverstärkter Thermoplast, Dualphasenstahl	Formschluss	Clinchen, Spritzguss	Umformung nach dem Verbinden der beiden Komponenten
2	K. Won-Seock, Y. Il-Han, L. Jung-Ju, J. Hee-Tae	(30)	Faserverstärktes Duromer, Metall	Adhäsion, Formschluss	Mikrostrukturierung	Einfluss der Topografie der mikrostrukturierten Metalloberfläche
3	J. Byskov-Nielsen, J. V. Boll, A. H. Holm, R. Hojsholt, P. Balling	(31)	Thermoplast, Metall	Adhäsion, Formschluss	Laserstrukturierung	Einfluss der Topografie der laserstrukturierten Metalloberfläche
4	U. Beyer	(32)	GFK, CFK, PS, Metall	Formschluss	Flach Clinchen	Umformung nach dem Verbinden der beiden Komponenten
5	K. Schrickler, M. Stambke, J. P. Bergmann, K. Bräutigam, P. Henckell	(33)	Thermoplast, Metall	Formschluss	Formschluss, Adhäsion	Kunststoff wird mit Druck und Temperatur mit Metallkomponente verbunden
6	F. Lambiase	(34)	PS, PC, PMMA, Aluminium	Formschluss	Clinchen	Kunststoff wird vor dem Clinchen aufgewärmt

7	H. Paul, M. Luke, F. Henning	(35)	Langfaserverstärkter Thermoplast, Metall	Formschluss, Kraftschluss, Adhäsion	Pressen	Differenziert das Versagensverhalten mittels Simulation
8	T. Mok Gwon, J. Ho Kim, G. Jin Choi, S. June Kim	(36)	verschiedene Thermoplaste und Metalle	Formschluss	Mikrostrukturierung	Verbindung mittels Heißpresse
9	E. Rodriguez-Vidal, C. Sanz, C. Soriano, J. Leunda, G. Verhaeghe	(37)	Thermoplast, Metall	Formschluss	Laserstrukturierung	Mikrostrukturierung, Metallseite wird mittels Laser erwärmt und mit dem Kunststoff verbunden
10	K. van der Straeten	(38)	Thermoplast, Metall	Formschluss	Laserstrukturierung	Nanostrukturierung, Metallseite wird mittels Laser erwärmt und mit dem Kunststoff verbunden
11	Fraunhofer IWS Dresden	(39)	Thermoplast, Metall	Stoffschluss	Laserstrukturierung	thermisches Direktfügen
12	Y. Xie, J. Zhang, T. Zhou	(40)	Thermoplast, Aluminium	Stoffschluss	Chemische Oberflächenbehandlung	thermisches Direktfügen
13	TU Chemnitz	(41)	Organoblech, Metall	Formschluss	strukturiertes Blech	mit Organo-blech heiß verformt, dadurch entsteht Formschluss mit metallischem Einleger
14	A. Ozlati, M. Movahedi, M. Tamizi, Z. Tartifzadeh, S. Alipour	(42)	PP, Al-Mg	Formschluss	strukturiertes Blech	thermisches Fügen
15	M. Rawa, D. Kuttner	(43)	Faserverstärktes Duomer, Metall	Adhäsion	Chemische Oberflächenbehandlung	Chemische Verbindung
16	H. Paul, M. Luke, M. Reif, F. Henning	(44)	PA6.6GF40, HC420LA	Formschluss, Kraftschluss, Adhäsion	Auszugsversuche	Zweikomponenten Spritzguss

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bereits einige hybride Verbindungen entwickelt wurden, insbesondere auch solche, die auf Formschluss basieren. Allerdings ist hier eine häufige Anwendung

das Clinchen mit einem Thermoplasten oder eine Mikro- oder Laserstrukturierung. Eine Strukturierung im Millimeterbereich findet eher selten statt. Insbesondere in Zusammenhang mit einem duroplastischen Kunststoff bedarf es hier noch Forschungstätigkeiten. An diesen Bedarf knüpft diese Arbeit an.

2.4 Stand der Forschung hybrider, formschlüssiger Verbindungen, ausgewählte Arbeiten

Im Folgenden werden unterschiedliche Verfahren aus Forschung und Entwicklung sowie bereits etablierter Methoden vorgestellt und diskutiert, bei denen der Fokus auf dem hybriden Zusammenhalt im Bereich der Grenzflächen liegt. (26)

2.4.1 Formschlüssige Verbindungen

Im Folgenden werden formschlüssige Verbindungen vorgestellt.

2.4.1.1 Schlaufentechnologie

Um flächige Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen herstellen zu können, war im DFG- Projekt Schwarz-Silber das Ziel, integrale Übergangsstrukturen zwischen Aluminium und CFK zu entwickeln, die zu einer Reduzierung von Gewicht und Bauraum sowie zu Vorteilen der optimierten Krafteinleitung führen (45). Dazu wurde sowohl ein Draht-, ein Faser- als auch ein Folienkonzept entwickelt. Beim Drahtkonzept werden durch Gieß- oder Schweißtechniken Titanösen auf einer Aluminiumoberfläche aufgebracht. Durch diese Ösen werden dann die Kohlenstofffasern hindurchgezogen.

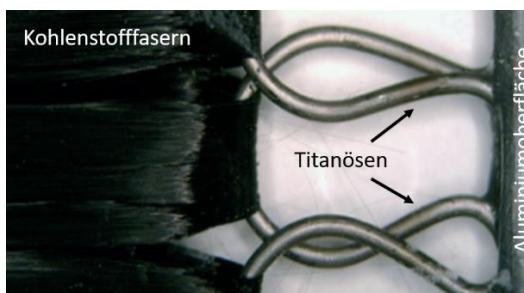


Abbildung 9: CFK-Aluminium-Hybridverbindung des DFG Projekts Schwarz-Silber (46)

Auf diese Art soll die Korrosion des Aluminiums vermieden werden. Allerdings beinhaltet diese Art der Herstellung enormen Aufwand im Aufbringen der Ösen und Durchziehen der Fasern.

Das Faserkonzept ist durch einen Glasfaser-Übergang zwischen CFK und Aluminium charakterisiert. Die Glasfasern werden partiell in Aluminium eingegossen. Dabei entsteht die CFK-GFK Verbindung durch eine formschlüssige Verbindung miniaturisierter Schlaufen. Des Weiteren gibt es in diesem Projekt ein Folienkonzept. Dort wird der Werkstoffübergang realisiert, indem einzelne CFK Lagen eines Laminates stufenweise durch Titanfolien ersetzt werden. Der entstehende reine Titanfolienaufbau wird an eine Aluminiumstruktur geschweißt (45). Die einzelnen Konzepte sind schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

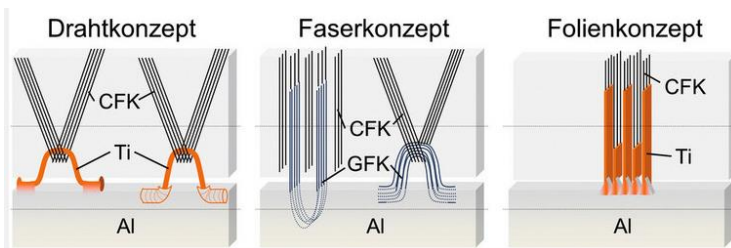


Abbildung 10: Anbindungskonzept der DFG Forschergruppe 1224 „Schwarz – Silber“ (45)

In der konstruktiven Gestaltung konzentrieren sich derartige Lösungsansätze vornehmlich auf punkt- bzw. flächen- oder schlaufenförmige Krafteinleitungen und eignen sich selten für die flächige Verbindung zweier Werkstoffpartner.

Im Projekt HyDru werden im Niederdruckgießverfahren Übergangsstrukturen zwischen Aluminium-Komponenten und verschiedenen anderen Werkstoffen, wie Aluminiumknetlegierungen, erzeugt (siehe Abbildung 11). Ziel ist es, dabei stoff- und formschlüssige Verbindungen zu schaffen.

dungen herzustellen, um angelegte Lasten kraftflussgerecht zwischen den Komponenten zu übertragen. (47)

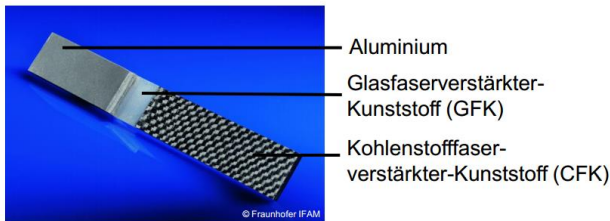


Abbildung 11: Probekörper aus dem Projekt HyDru (48)

Ein Vorteil ist, dass somit verschiedene Komponenten werkstoffgerecht miteinander verbunden werden können. Nachteilig ist allerdings der Aufwand, der dafür benötigt wird.

2.4.1.2 Pintechnologie

Um eine belastungsrichtungsunabhängige Verbindung von Kunststoff und Metall zu entwickeln, wurde am Austrian Institut of Technology (AIT) ein Verfahren entwickelt, bei dem Pins mittels eines speziellen Schweißverfahrens auf die Metalloberseite aufgebracht werden. Dabei handelt es sich um die Cold Metal Transfer Technologie (CMT). Diese ist eine Weiterentwicklung des MIG-/MAG-Schweißens, bei dem der Vorschub (Vor- und Zurückbewegung) des Schweißdrahtes geregelt wird. Es können verschiedene Geometrien von Pins aufgeschweißt werden, siehe Abbildung 12 und Abbildung 13.



Abbildung 12: Im CMT Verfahren aufgeschweißte Pins (49)

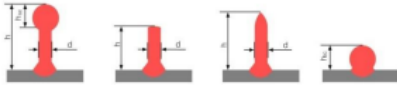


Abbildung 13: Verschiedene Ausführungen möglicher Pins (49)

Das Ziel ist dabei die Herstellung einer haltbaren Verbindung zwischen einer metallischen Komponente und einer Kunststoffkomponente ohne die Fasern zu beschädigen oder die Pins richtungsabhängig herstellen zu müssen. Allerdings ist die Fertigung insgesamt sehr aufwendig. Die fertige Metallkomponente kann dann sowohl mit trockenen Fasermatten als auch mit Prepregs belegt werden. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen getestete Pull Out Proben zweier verschiedener Pin Arten.



Abbildung 14: Kugelpins (49)



Abbildung 15: Zylinderpins (49)

Im AIF-Cluster „Großserientaugliche Prozessketten für hochintegrierte Bauteile aus hybriden Faser-Kunststoff/Metall-Verbunden“ werden unterschiedliche Pin-Ausprägungen in Breite und Höhe durch einen Setzprozess hergestellt. Der Setzprozess sieht vor, dass vorgefertigte selbstlochende Pins verwendet werden, die ein zusätzliches Hilfs-

fügeteil darstellen. Durch ein spezielles Werkzeug wird der Pin direkt in die Blechoberfläche eingebracht und der austretende Butzen durch die Matrize abgeführt. Durch das Einbringen entstehen hohe Kontaktnormalspannungen zwischen Metall und Pin-Element sowie ein Schneidgrad am Austritt des Butzens (Abbildung 16).

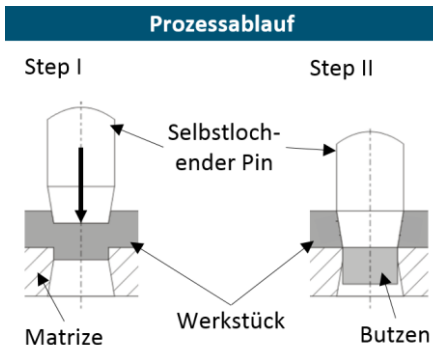


Abbildung 16: Selbstlochende PIN-Elemente (50)

In diesem Cluster wurde weiterhin eine Prägetechnik untersucht, mit der Pin-Strukturen in die metallische Oberfläche eingebracht werden können. Das Verfahren benötigt kein zusätzliches Material oder Hilfsfügeelemente, sondern generiert den Pin aus dem Material des Halbzeugs heraus. Unterschiedliche Pin-Geometrien sind durch verschiedene Stempel- und Matrizenwerkzeuge einstellbar (Abbildung 17).

Hinterschnittige Strukturen, wie bei der CMT Technik, sind allerdings nicht möglich. Die Untersuchungen wurden an Stahl- (HC260LA) und Aluminiumwerkstoffen ($AlMg_3$) durchgeführt und es konnten rissfreie Pin-Prägungen hergestellt werden. Wie beim Setzvorgang muss beim Prägen das metallische Halbzeug von beiden Seiten zugänglich sein. Gekrümmte Oberflächen setzen eine dementsprechend geformte Matrize voraus. Das metallische Halbzeug muss für die selbstlochenden Pins eine entsprechende Festigkeit aufweisen und für den Prägevorgang fließfähig sein. (26)

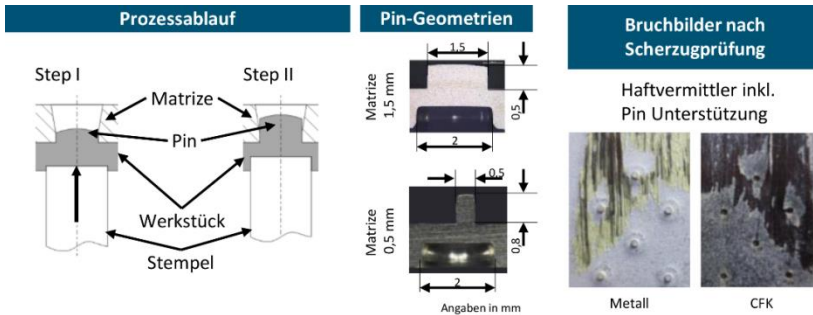


Abbildung 17: Geprägte Pinelemente (50)

2.4.1.3 Klettverschlussstechnologie

Aus der Textilbranche ist der Klettverschluss bekannt. Dabei handelt es sich um zwei Teile, bei dem der eine Teil Widerhaken und der andere Teil Ösen beinhaltet. Die Widerhaken greifen in die Ösen und bilden auf diese Art eine formschlüssige Verbindung, die man reversibel trennen und verbinden kann.

Einen ähnlichen Mechanismus gibt es aus Metall. Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München (TUM) wurden nun Klettverschlüsse aus Federstahl entwickelt. Sie sind gegen Chemikalien beständig und halten auch bei 800°C noch einem Zug von bis zu 35 Tonnen pro Quadratmeter stand (51). Ein Bild des Metakletts® ist in Abbildung 18 dargestellt. Dabei handelt es sich um die Variante „Entenkopf“, dessen Datenblatt im Anhang 8.1 zu finden ist.

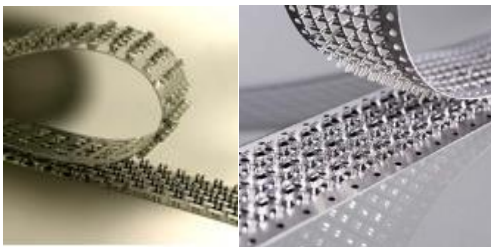


Abbildung 18: Metaklett®, Entenkopf (51)

Die Komponente mit den Widerhaken kann sowohl in Verbindung mit natürlichen und technischen Fasern als auch mit Metallfasern eingesetzt werden (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Metaklett® mit Metallfasern (52)

2.4.1.4 Oberflächenstrukturierung mittels Laser

Durch das Einwirken energetischer Strahlung kann die Oberfläche metallischer Halbzeuge aufgeraut und mit einer hinterschnittigen Oberflächenstrukturierung versehen werden. Dabei ist sogar gleichzeitig eine Reinigung und chemische Aktivierung der metallischen Oberfläche möglich. Im Zusammenhang mit der Erzeugung einer formschlüssigen Verbindung zwischen Metall und FVK eignen sich grundsätzlich Elektronen- oder Laserstrahlen, wie z.B. Nd:YAG Laser, die das Metall zum Schmelzen und Sublimieren bringen können (53). Durch die eingebrachte Energie in das Metall wird dieses aufgeschmolzen, sodass ein lokales Schmelzbad entsteht. Dieses breitet sich mit der Verfahrensbewegung des fokussierten Strahls aus. Hierbei verdampft kontinuierlich Material in der entstehenden Vertiefung. Der Dampfdruck führt wiederum dazu, dass flüssiges Material entgegen der Bewegungsrichtung des Laserstrahls aus der Vertiefung austritt. In der Folge erstarrt das Material und bildet eine Ausbuchtung auf der Oberfläche (54).

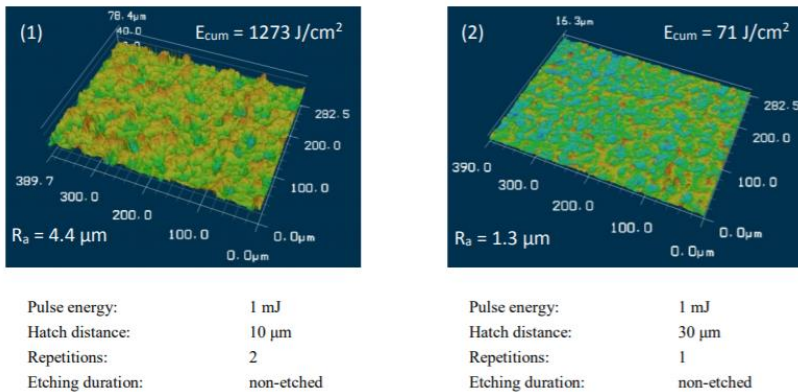


Abbildung 20: REM Aufnahmen von Aluminiumoberflächen mit verschiedenen Laserbehandlungen (55)

In Abbildung 20 ist die Aluminium-Oberfläche nach verschiedenen Laserbehandlungen dargestellt. Je nach Intensität und Dauer verändert sich die Topografie der Oberfläche. Es kann dabei gezielt eine Oberflächenstruktur entstehen, die mit der Kunststoffkomponente eine formschlüssige Verbindung eingehen kann, ähnlich wie eine gestrahlte Oberfläche. Durch den Laser kann die Metalloberfläche allerdings gezielter und gerichteter behandelt werden. Beim Strahlen wird allein durch das Strahlmittel eine „rauhe“ Oberfläche mit gleichverteilten offenen Poren erschaffen. Durch den Laser können die Aufwürfe gezielt in definierte Richtungen geschoben werden.

2.4.1.5 Automatisierte Herstellung von Oberflächenstrukturen

Komponenten von Bremssystemen im Automotivbereich werden von der kanadischen Firma Grip Metal mit mechanischen Oberflächenstrukturen (Haken) automatisiert hergestellt.

Auf Grund der Strukturierung kann der Bremsenbelag mit der Rückenplatte formschlüssig verbunden werden, siehe Abbildung 21.

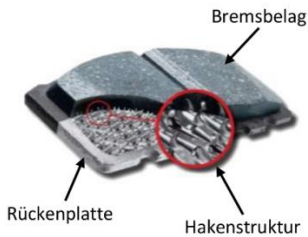


Abbildung 21: GRIP Metal™ - Anwendungsfälle (56)

Die Strukturierung erfolgt automatisiert über Walzen mit Prägevorrichtung.

Während das Blech in die Walzen eingezogen wird, wird es gleichzeitig mit den Strukturen versehen. GRIP Metal™ strukturiert sowohl mit verschiedenen Walzen verschieden ausgeformte Strukturen als auch verschiedene Werkstoffe, siehe Abbildung 22.



Abbildung 22: GRIP Metal™ verschiedene Werkstoffe (57)

Diese Metallbänder können ebenso mit CFK belegt werden, siehe Abbildung 23.

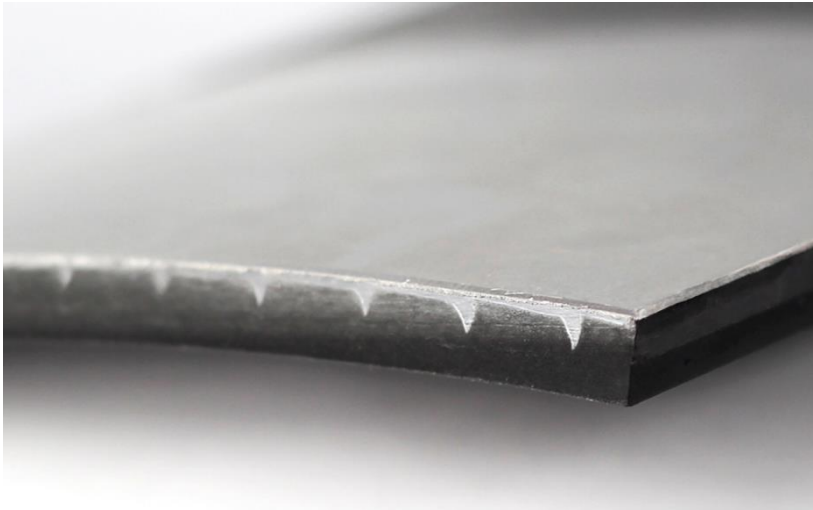


Abbildung 23: GRIP Metal™ mit CFK verbunden (57)

Die Automatisierung ist ein Vorteil dieser Herstellungsart, allerdings können diese Strukturen ausschließlich in eine Richtung über das Prägwerkzeug hergestellt werden. Somit kann der Lastpfad nur in eine Richtung gehen.

2.4.1.6 Beispiel Thermoplast im Spritzgussprozess

Schon in den neunziger Jahren wurde bereits an dem Verbund von Kunststoffen mit Metallen geforscht. Dabei ging es um den schon zu dieser Zeit serientauglichen Spritzguss-Prozess (58).

Dieser Prozess besteht aus zwei Stufen in denen ein metallischer Einleger mit einem Thermoplast hinterspritzt wurde. Durch das Hinterspritzen und die Schrumpfung des Kunststoffes kommt es zu einer formschlüssigen Verbindung der beiden Komponenten.

Hierbei bietet das Verfahren des In-Mould-Assembly (IMA), im Gegensatz zum Post-Mould-Assembly (PMA), eine herausragende Wirtschaftlichkeit, da die Bauteile die Spritzgießmaschine bereits endmontagefertig verlassen. Die Kraftübertragung zwischen den

ungleichen Werkstoffklassen erfolgt meist an form- und kraftschlüssigen Verbindungspunkten wie Sicken und Clinchen (59). Ein Beispiel für ein derartiges Bauteil ist bspw. der Erlanger Träger, wie in Abbildung 24 dargestellt.



Abbildung 24: Erlanger Träger aus Stahl mit Rippen aus Polyamid 6 (59)

2.4.2 Kraftschlüssige Verbindungen

Zu den kraftschlüssigen Verbindungen zählen unter anderem Niet- und Schraubverbindungen. Diese werden nun kurz vorgestellt.

2.4.2.1 Nietverbindung, Beispiel HiLok



Abbildung 25: Titan Niet HiLok von Hi-Shear Corporation

Bei diesen HiLok Nieten (siehe Abbildung 25) handelt es sich um Schraubniete. Diese werden von Airbus u.a. für Fail/Safe Anwendungen im Flugzeugbau verwendet. Dabei wird eine Passung in die zu nietende Stelle gebohrt, dann der Niet durchgesteckt und mittels

Innen- und Außensechskant verschraubt. Durch Abscheren des Schraubkopfes bei einem definierten Drehmoment (von 18 Nm) wird eine gleichbleibende Qualität gewährleistet.

In einem CFK Bauteil beträgt der Abstand zwischen den Nieten 25 mm. Die Niete können nicht zerstörungsfrei gelöst werden. Die zugehörige Montageanleitung befindet sich in Anhang 8.2.

2.4.2.2 Schraubverbindungen

Ebenso, wie Nietverbindungen, ist es möglich, Schraubverbindungen einzusetzen. Auch dabei muss das zu verschraubende Material vorgebohrt werden, bevor Schraube und Mutter befestigt werden können. Der Unterschied zur Nietverbindung besteht darin, dass die Schraubverbindung selbst reversibel lösbar ist. In dieser Arbeit wird die Schraubverbindung der Vollständigkeit halber erwähnt, findet sich aber im experimentellen Bereich nicht wieder.

2.4.2.3 Inserts aus Metall

Strenggenommen gehören Metallinserts in Bauteilen eher in die Kategorie Formschluss. Allerdings wird durch Inserts im Faserverbundbauteil oftmals der Kraftschluss gewährleistet, daher finden sie sich in diesem Kapitel wieder. Durch vorher geplante Inserts können Anbindungen in faserverstärktem Kunststoff, ohne das Fasermaterial zu beschädigen, realisiert werden. Es gibt konventionelle Inserts, die bei der Bauteilerstellung vor Infusion in die Fasern integriert werden und somit formschlüssig verbunden sind. Anschließend kann an den Stellen, an denen sich die Inserts befinden, z.B. gebohrt oder ein Gewinde geschnitten werden.

In Forschungsarbeiten, wie z.B. dem Sonderforschungsprogramm SPP 1712, werden Inserts als Multilayer in die einzelnen Faserlagen integriert (siehe Abbildung 26).

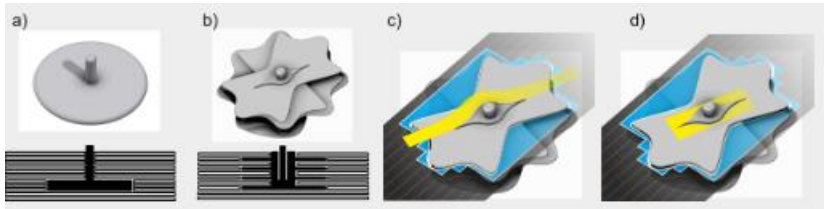


Abbildung 26: Anschauungsbeispiele Multilayerinserts (MLI) (60)

Das Anschauungsbeispiel zeigt die Idee des neuen MLI (b) im Vergleich zu einem konventionellen Insert (a). Das MLI baut auf einer Grundplatte z. B. mit einem zentrierenden Stehbolzen auf. Mit fortschreitendem Ablageprozess werden weitere Einzellagen des MLI zentriert auf den darunter befindlichen Lagen aufgesetzt. Ihre Form orientiert sich an der Faserausrichtung in den benachbarten FKV-Lagen. Um den Einschränkungen dieses Prozesses beispielsweise durch einen zentrierenden Bolzen Rechnung zu tragen, befinden sich in seiner Umgebung Materialzusätze, die den Bereich ausfüllen, der vom Legkopf nicht mehr erreicht werden kann. Sie sind hier so gestaltet, dass die Tows um sie herum abgelegt werden (c) oder bis zu einem zusätzlichen Prepreg-Patch an den Bolzen herangelegt werden können (d). (60)

2.4.3 Stoffschlüssige Verbindung (Adhäsion)

Im Folgenden wird ebenfalls die stoffschlüssige Verbindung näher erläutert.

2.4.3.1 Klebtechnik

Da diese Arbeit keinen Fokus auf die Weiterentwicklung der Oberflächenbehandlung bzw. adhäsiven Verbindung legt, sondern auf die formschlüssige Verbindung durch mechanische Strukturierung von Oberflächen in einem hybriden Bauteil abzielt, erfolgt hier keine umfassende Darstellung der Forschung zur Klebtechnologie. Da sie aber als Referenzverbindung der hier charakterisierten Hybridverbindung dient, wird ein Beispiel aus aktueller Forschung hier er-

wähnt. Ebenso werden die grundsätzlichen Zusammenhänge zur Klebtechnik aufgeführt.

Im gemeinschaftlichen DFG Projekt (61) „Einstufige Herstellung von Metall-Polymer-Metall-Sandwichstrukturen mit faserverstärktem Kern: Experiment, Modellbildung und Simulation“ der Institute für Technische Mechanik, Metallurgie und Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal wird zur Minimierung von Ressourcen sowie Prozessschritten die einstufige Herstellung von Sandwichbauteilen mit lokalen Verstärkungen untersucht. Zunächst wurden Grundlagen für die einstufige Herstellung ohne lokale Verstärkungselemente geschaffen. Hierzu dient ein dreischichtiger Verbund aus Stahl/glasfaserverstärktem Polyamid/Stahl. Eine besondere Aufgabe ist es, einerseits das Werkstoffverhalten von metallischen und Faserverbundwerkstoffen zu charakterisieren und das Verhalten bei Umformung der gekoppelten Strukturen zu beschreiben (siehe Abbildung 27). Andererseits ist die Entwicklung und Untersuchung eines geeigneten mikromechanisch motivierten Materialmodells auf der Basis numerischer Homogenisierung durchzuführen. Darüber hinaus ist ein Ziel, die Verwendung einer neuen numerischen Herangehensweise, um Werkstoff- und Bauteilsimulationen durchführen zu können. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, neue Prozessführungen für die unterschiedlichsten geometrischen Abmessungen und komplexe Strukturen mit verschiedenen Textilien und Faserverbunden zu finden. Ausreichende Validierungsuntersuchungen und der Nachweis der Prognosefähigkeit begleiten kontinuierlich das Programm.

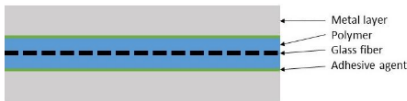


Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Sandwichverbundes

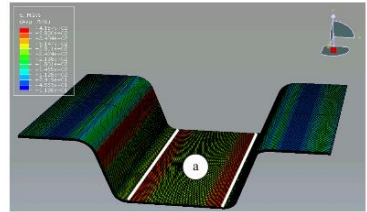


Abbildung 28: FEM Simulation von PA6 galvanisiertem Stahlhybriden

Ziel des Vorhabens ist die Darstellung der Prozesskette für die einstufige Erzeugung von komplexen dreidimensional geformten Sandwichsystemen mit metallischen Deckschichten und thermoplastischen Faserverbundkernschichten, ähnlich wie beim Tiefziehen. Die Einzelelemente werden – u.a. zur ressourcenoptimierten Nutzung der Werkstoffpaarungen bei minimiertem Materialhandling – als Halbzeuge mit Endabmessungen erzeugt und in einem Arbeitsschritt verbunden und umgeformt. In einer zweiten Antragsphase soll das Verständnis erweitert werden für örtlich definiert ausgelegte, eingebrachte Lasteinleitungselemente bzw. Verstärkungen, die für lösbare (Schraub-) und unlösbare (Schweiß-) Verbindungen erforderlich sind. Zudem sollen die Möglichkeiten und Grenzen zur Erzeugung komplexerer Tiefziehgeometrien und deren simulative Beschreibung, wie z.B. in Abbildung 28, im Zentrum des Projektes stehen.

Grundsätzlich ist die Adhäsion eine Bindungskraft, auf der die Verbindung zweier Fügepartner mittels eines Haftvermittlers (Klebers) beruht. Der schematische Aufbau einer Klebung ist in Abbildung 29 dargestellt. Hier ist der Klebstoff auf dem Fügeteil, inkl. der beiden Grenzschichten, dargestellt.

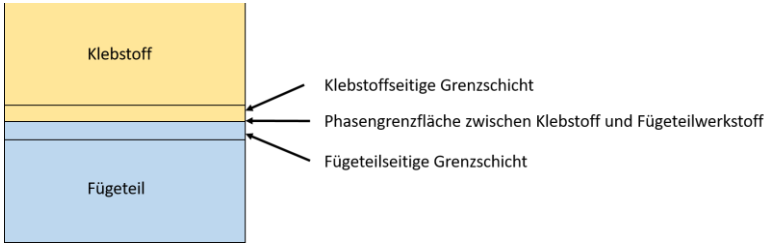


Abbildung 29: Schematischer Aufbau einer Klebung (62)

Um ein Hybridbauteil zu verkleben, muss ein für beide Fügepartner geeigneter Klebstoff ausgewählt werden. Eventuell muss die Oberfläche nicht nur von Verunreinigungen (Produktionsrückständen, Staub) befreit werden, sondern auch vorbehandelt werden. Die Adhäsionskraft kann dadurch vergrößert werden, dass die Oberfläche der zu klebenden Fläche mittels Strahlmittel vergrößert wird. Das kann sowohl für die metallische als auch für die Kunststoffseite gelten. (62)

2.5 Zusammenfassung und Einordnung der neuen Hybridverbindung

Das Potenzial hybrider Werkstoffe oder Bauteile hängt zum größten Teil von der Verbindungsqualität an der Grenzfläche der einzelnen Materialkomponenten ab. Die beschriebenen Forschungsarbeiten zeigen Möglichkeiten auf, wie die Oberfläche der Fügepartner modifiziert werden kann, um die Strukturintegrität an den Grenzflächen zu erhöhen. Einige der genannten Forschungsthemen stellen (noch) keine Serientauglichkeit in industriellen Anwendungen dar. Bei z.B. der Ösentechnik der TUM ist der Verbindungsprozess derart aufwendig, dass er noch nicht für Bauteile genutzt werden kann.

Aufgrund der Komplexität der meisten Verfahren, der benötigten Anlagentechnik sowie der Prozesszeiten, ist eine wirtschaftliche Umsetzung für die Fertigung hybrider Bauteile in größeren Stückzahlen nur eingeschränkt möglich. Insofern besteht noch viel Forschungsbedarf hinsichtlich Reversibilität und Automatisierbarkeit. In dieser Arbeit wurde eine Hybridverbindung mit einer Strukturie-

rungsmöglichkeit getestet, die robust, reproduzierbar, flexibel und einfach ist und damit einige der oben genannten Möglichkeiten miteinander vereinen bzw. ergänzen soll. Die Bearbeitung der Metalloberfläche in diesem Forschungsvorhaben ist mit einfachen Maschinen, wie einer C-Bügel Ständermaschine (hier verwendet: DFG 500/150 der Firma ECKOLD GmbH & Co. KG) oder ähnlichen Maschinen, die die Kraft senkrecht auf ein Bauteil einwirken lassen, möglich. Ebenso können programmierbare Maschinen benutzt werden, die automatisiert die Strukturen erzeugen. Das Strukturierungswerkzeug ist aus gehärtetem Stahl (X155CrVMo121, Nr. 1.2379) und hat somit eine sehr hohe Lebensdauer und Reproduzierbarkeit (darauf wird in Kapitel 4.4.1 näher eingegangen). Die Verbindung der Metallseite mit dem faserverstärktem Kunststoff kann sowohl händisch als auch automatisiert erfolgen. Die Verbindung ist flexibel einsetzbar für verschiedene Geometrien, bzw. auch gekrümmte Oberflächen.

Potenziale werden in der Hybridverbindung grundsätzlich im Innenbereich eines Automobils gesehen, um z.B. Vibrationen oder andere Geräuschemissionen zu vermeiden.

3 Probenherstellung und -analyse

3.1 Herstellung der Hybridverbindungen

Im Folgenden wird die Herstellung der Hybridverbindung dargestellt. Die metallische Komponente, bestehend aus der Aluminiumlegierung AlCuMg1-2017, wurde in der kompletten Arbeit nicht variiert. Die Strukturausprägung/-anordnung/-anzahl wurde aus dem AIF Projekt 18112N/1 EFB 06/113 in Kooperation mit der TU Braunschweig von Michael Brand, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, übernommen und nicht verändert.

Die Einzelkomponenten bestehen aus dem Kunststoffteil, bzw. Faserverbundteil (siehe Abbildung 30) und dem Metallteil (siehe Abbildung 31) und haben beide eine Materialstärke von 2 mm. Die Kunststoffseite war sowohl faserverstärkt als auch unverstärkt, wird im Folgenden aber als Kunststoff bezeichnet.

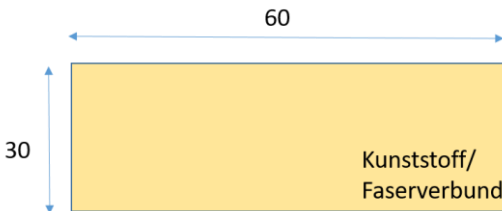


Abbildung 30: Geometrische Abmaße der Kunststoffseite in mm, schematisch

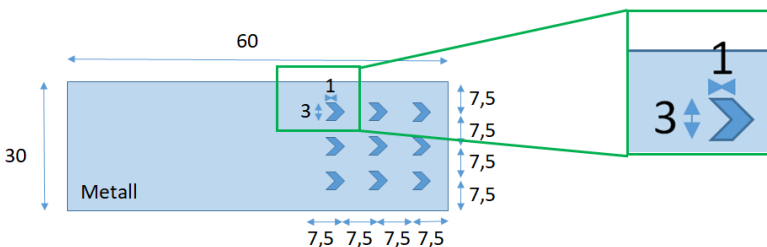


Abbildung 31: Geometrische Abmaße der Metallseite in mm, schematisch

Die hier verwendete Hybridverbindung ist wie in Abbildung 32 aufgebaut:

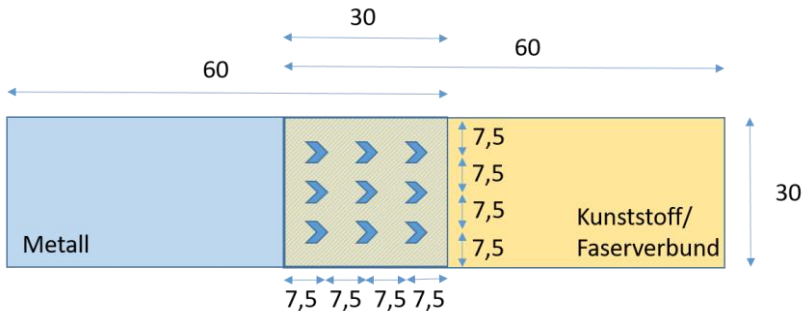


Abbildung 32: Geometrische Abmaße der Hybridverbindung im mm, schematisch

3.1.1 Metallkomponente

Die metallische Komponente, also das Aluminium 2017, wurde mittels einer universellen, hydraulisch arbeitenden, C-Bügel-Ständermaschine (DFG 500/150) der Firma ECKOLD GmbH & Co. KG strukturiert. Bei der Strukturierung handelt es sich um einen Kaltumformprozess, bei dem ein Werkzeug, das einen Hohlkegel aufweist (siehe Abbildung 33), in das Metallblech einsticht und dabei die Strukturen aufwirft. Diese bilden dabei kleine Hinterschneidungen. Das Metallblech hat die Maße 60 mm x 30 mm x 2 mm.



Abbildung 33: Strukturierungswerkzeug

Für einen geringen Verschleiß wurde ein gehärteter Stahl (X155CrVMo121, Nr. 1.2379) für das Werkzeug verwendet.

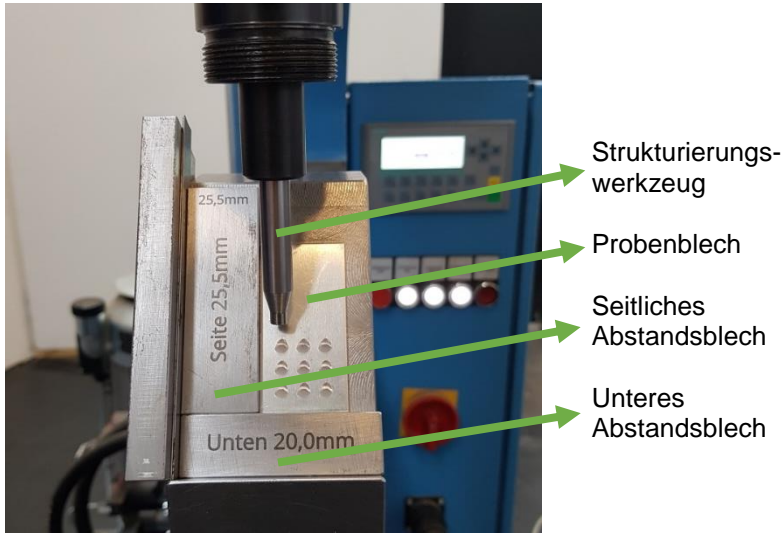


Abbildung 34: Universelle, hydraulische C-Bügel-Ständermaschine DFG 500/150 der Firma ECKOLD GmbH & Co. KG

In Abbildung 34 ist die C-Bügel Maschine der Firma ECKOLD GmbH & Co KG dargestellt. Mit Hilfe der seitlichen und unteren Abstandsbleche wurde sichergestellt, dass die Strukturen immer im gleichen Abstand zueinander entstanden.

Hergestellt wurden immer 9 Strukturen (siehe Abbildung 35), äquidistant verteilt, je Blech auf die Hälfte der Fläche der Metallkomponente.

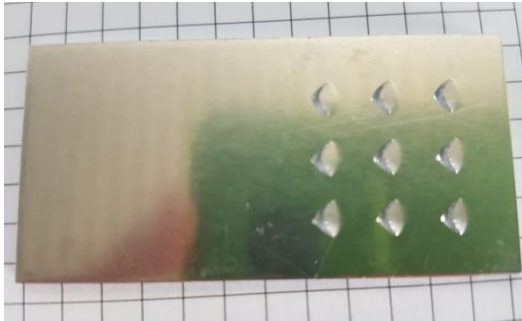


Abbildung 35: Aluminium Blech nach Strukturierung

Die Anordnung der Strukturen ist somit waagrecht und senkrecht. Das Werkzeug dringt 0,8 mm mit einem Winkel von 45° in das Aluminium ein. Die Strukturlänge beträgt ca. 2 mm. Die Strukturen wurden 180° entgegengesetzt zur Krafteinwirkung ausgerichtet.

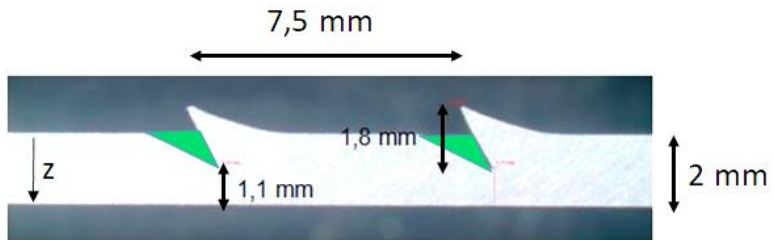


Abbildung 36: Schnitt durch die erzeugten Strukturen.

In Abbildung 36 ist die Vermessung der Strukturen zu erkennen. Die grün gekennzeichneten Dreiecke können während der Faserablage nicht mit Fasern gefüllt werden, da dieser Bereich in die Tiefe des Bleches in z-Richtung ausgehöhlt wird, vergleiche Abbildung 37. Hier ist die Aufsicht auf eine Einzelstruktur einer strukturierten Probe dargestellt. Das Bild wurde mit einem Laserscanningmikroskop der Firma Keyence der Reihe VK-X1000 aufgenommen.

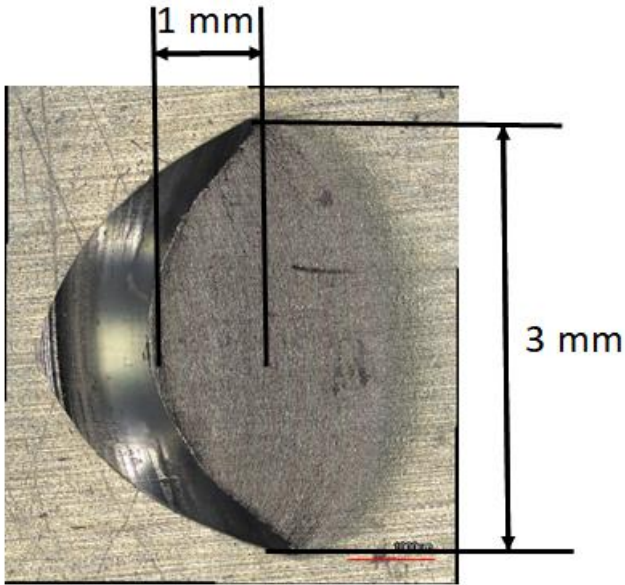


Abbildung 37: Aufsicht Einzelstruktur mittels Laserscanningmikroskop (Keyence, VK-X1000)

3.1.2 Kunststoffkomponente

Der faserverstärkte Kunststoffteil der Hybridverbindung, bzw. auch die „monolithische“ Referenzverbindung, wird im VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion) Verfahren hergestellt, siehe Abbildung 38. Verwendet werden Kohlenstofffasern (HP-U500-123C, Datenblatt siehe Anhang 8.3) und Glasfasern (TDS-HP-U600E, Datenblatt siehe Anhang 8.4) der Firma HP-TeXtles. Das Harzsystem ist von der Firma Hexion (Harz: EpikoteRIM135, Härter: EpikureRIMH1366, Datenblatt mit Kurzcharakteristik im Anhang 8.5)

Mit dem VARI-Verfahren werden glas- und kohlenstofffaserverstärkte Platten bzw. ein Hybridaufbau aus diesen genannten Materialien und dem strukturierten Blech aus 3.1.1 gefertigt. Die so erzeugten Platten werden anschließend hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und der Qualität der Verbindung Aluminium/GFK bzw. Aluminium/CFK oder auch einzeln untersucht werden.

Beim VARI-Verfahren wird das mit Harz zu imprägnierende Gewebe/Gelege in einem Vakuumaufbau kompaktiert, dabei wird idealerweise die gesamte Luft aus dem Aufbau entzogen. Anschließend wird das entgaste Harz/Härter-Gemisch über den angelegten Unterdruck in die Form bzw. den Lagenaufbau hineingezogen (Abbildung 38). Im nachfolgenden wird dieser Aufbau näher erläutert.

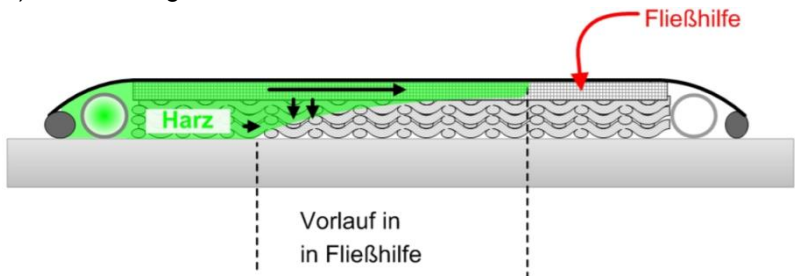


Abbildung 38: VARI Aufbau, schematisch

In dieser Arbeit sollen ebene Platten hergestellt werden. Als untere Formhälfte dient eine Stahlplatte mit einer glatten Oberfläche.

Diese wird vor jedem Gebrauch mit Aceton gereinigt. Um ein leichtes Entformen (ohne viel Kraftaufwand, zur Vermeidung von Beschädigungen der Probe) zu ermöglichen, wird die Stahlplatte vor jedem Aufbau mit einem Trennwachs beschichtet (REXCO mold care; Formula five mold release wax). Dieses ist mit Poliertüchern gleichmäßig aufzutragen, überschüssiges Wachs wird dadurch entsprechend entfernt.

Die vorher zugeschnittenen Faserlagen (Glas- oder Kohlenstofffasern) werden anschließend auf die eingetrennte Stahloberfläche entsprechend der Vorgaben abgelegt.

Für eine optimale Kraftübertragung werden grundsätzlich Faservolumenanteile von ca. 60 % angestrebt. Da es sich bei diesem Fertigungsverfahren um ein händisches Verfahren handelt, ist ein Faservolumenanteil von 50 % realistisch. Für die gewählte Probendicke (2 mm) und dem angestrebten Faservolumenanteil von 50 %, werden je Aufbau 4 Lagen benötigt. Dieser Lagenaufbau wird entweder in $0^\circ/90^\circ$ oder in $\pm 45^\circ$ angeordnet, siehe Abbildung 39 und Abbildung 40.

Beim $0^\circ/90^\circ$ Aufbau wird darauf geachtet, dass die erste Lage quer zu den Strukturen gelegt wird, um zu gewährleisten, dass die Rovings unter die Strukturen geschoben werden können. Beide Aufbauten werden aber symmetrisch angeordnet.

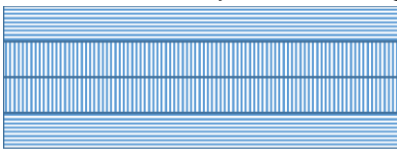


Abbildung 39: Lagenaufbau $0^\circ/90^\circ$



Abbildung 40: Lagenaufbau $\pm 45^\circ$

Die Zuschnitte für die Lagen besitzen Abmaße von ca. 150 mm x 300 mm. Dabei werden, um ein Verdrillen der Platte durch Vorzugsorientierungen der Fasergelege durch z.B. der Lagerung auf einer Rolle zu vermeiden, die Ober- bzw. Unterseite alternierend, symmetrisch aufeinandergelegt. Der Lagenaufbau wird gegen ein Verrutschen, wenn nötig mit handelsüblichen Kreppband bzw.

Airtech-Tape fixiert. Bei den strukturierten Probenblechen werden als nächstes die Aluminiumplättchen auf den Lagenaufbau platziert. Dazu werden diese (mit den Zähnen zu den Fasernweisend) auf den Lagenaufbau abgelegt und händisch nach unten gedrückt und mit der Zahnöffnung zu den Rovings gezogen bis ein merklicher Widerstand zu spüren ist. Dieser Widerstand wird als Einhaken der Rovings/Fasern in den Zähnen wahrgenommen und definiert. In Abbildung 41 ist beispielhaft eine schematische Seitenansicht einer Struktur mit einem hinterliegenden Roving dargestellt. In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist beispielhaft ein einzelner Roving hinter die Strukturen gelegt. Ebenso werden die Rovings vom kompletten Gelege hinter die Strukturen gebracht.

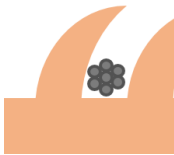


Abbildung 41: Roving hinter einer Struktur, schematisch, Seitenansicht



Abbildung 42: Roving hinter Strukturen, Draufsicht

Die Aluminiumplättchen sind bei der Ablage bzw. Ausrichtung entsprechend der Faserorientierung anzuordnen. Die einzelnen Plättchen liegen idealerweise parallel zueinander, sodass die Faserorientierung bei allen gleich ist. Auf diese Art werden 10 Proben gleichzeitig hergestellt, die später mittels Präzisionssäge getrennt werden.

Die obere Werkzeughälfte stellt die Vakuumfolie dar. Um ein zerstörungsfreies Lösen dieser von der Plattenoberfläche zu realisieren, wird der gesamte Lagenaufbau (+ auf jeder Seite ca. 10 mm) mit einem Abreißgewebe versehen. Über dieses wird eine Fließhilfe gelegt, jedoch nicht über den gesamten Lagenaufbau sondern nur über die ersten ca. 100 mm. Wichtig ist, dass die Fließhilfe direkt am Anguss liegt, um ein zum Beginn der Infusion leichtes Durchdringen bzw. Überspülen des Harzes zu realisieren. Das Überspülen ist je-

doch auch der Grund dafür, warum die Fließhilfe nicht über den gesamten Lagenaufbau reicht. Wäre dies der Fall, würde das Harz zu schnell an die Absaugung gelangen und nicht in die Tiefe (Bauteildicke) eindringen. Eine zu geringe Imprägnierung und somit trockene Stellen wären die Folge. An der Angussseite wird vor die gesamte Plattenbreite ein Spiralschlauch gelegt. Dieser wird etwas gedehnt, sodass der Einlass gewährleistet ist.

Dieser Schlauch wird mit Airtech Klebeband an der unteren Werkzeugseite fixiert. In einem Ende dieses Schlauches wird ein Kunststoffschlauch (PVC 5/8 Zoll) fixiert. Durch diesen wird das Harz infundiert. An der gegenüberliegenden Plattenseite wird die Absaugung installiert. Diese besteht aus einem Textilvlies, das durch entsprechendes Falten mindestens genauso dick ist wie der Lagenaufbau. In diesem Textil wird der Schlauch zur Absaugung (Harzfalle) vorgelegt. Dieser Schlauch ist möglichst nahe an das Textil zu positionieren. Auch die Anordnung kann, wenn nötig, mit Airtech-Tape fixiert werden. Um den gesamten Aufbau wird ein Rahmen aus Vakuumdichtband, Tacky Tape, gelegt. Dieses dient als Klebeband um die Vakuumfolie zu fixieren und um den gesamten Aufbau dicht von der Umgebungsatmosphäre abzuschließen.

Nachdem der gesamte Aufbau auf Vollständigkeit und korrekter Anordnung überprüft worden ist, wird die Vakuumfolie auf diesen gelegt und mit dem Tacky-Tape fest fixiert und verschlossen. Durch Andrücken und Vermeiden von Falten auf dem Tacky-Tape wird die benötigte Dichtigkeit erreicht. Nach der Fertigstellung des Aufbaus wird dieser auf Dichtigkeit geprüft. Dazu wird an der Absaugung eine Harzfalle installiert. Diese besteht im Wesentlichen aus einem abgedichteten Glas, in dem sich ein Einwegbecher zum Auffangen des überschüssigen Harzes befindet, und einem Aluminiumdeckel, in dem sich entsprechende Steckanschlüsse befinden, um das Vakuumaggregat und den Schlauch der Absaugung anschließen zu können. Prinzipiell lassen sich drei Absaugschläuche an einer Vakuumfalle installieren, wenn dies nicht erwünscht ist, werden die Steckan-

schlüsse mit Blindstutzen verschlossen. An der Infusionsseite wird ein Manometer installiert.

Um den Harz- bzw. Luftfluss zu stoppen, werden an den Schläuchen Schlauchklemmen angebracht. Um das System auf Dichtigkeit zu prüfen, wird das Ventil zum Kompressor geöffnet, die Luft wird aus dem Aufbau gesaugt, nachdem sich ein Druck von ca. 200 mbar in dem Aufbau eingestellt hat, wird der Schlauch an der Absaugseite mit der Klemme abgesperrt. Der Druck (ca. 200 mbar) ist für mindestens 15 Minuten zu halten, um eine ausreichende Dichtigkeit zu garantieren. Wenn dies nicht der Fall ist, muss entsprechend nachgearbeitet werden.

Wenn der VARI-Aufbau dicht ist, kann das Harz/Härter Gemisch (Mischungsverhältnis 100:30) abgewogen werden. Die benötigte Menge wird entsprechend der Infusionen angepasst. Je Lagenaufbau (In Abhängigkeit von dessen Größe, Schlauchlänge etc.) werden 350 – 450 g Harz/Härter benötigt. Diese werden entsprechend des angegebenen Mischverhältnisses in einem verschließbaren Becher eingebracht und vermischt. Dies geschieht mit dem Thinky Mixer (ARV-310, C3 Prozess- und Analysetechnik GmbH), mittels dessen das Harz/Härter Gemisch beim Mischprozess entgast werden kann.

Nach dem Anmischen wird das Gemisch auf noch verbleibende Gasblasen bzw. auf eine Phasentrennung (Phasengrenze) überprüft. Sollten diese erkennbar sein ist ein weiteres Mischen erforderlich. Die benötigte Harz/Härter-Gesamtmenge wird in ein ausreichend großes Einwegbecherglas überführt. In diesem wird der angussseitige Schlauch gegeben und mit Klebeband an dem Becher fixiert. (Davor werden alle Schlauchklemmen geschlossen und das Manometer entfernt). Anschließend wird zuerst die Schlauchklemme der Absaugseite und dann die Schlauchklemme der Angussseite vorsichtig geöffnet. Das Harz-/Härtergemisch beginnt über den Spiralschlauch des Angusses in den Aufbau zu fließen. Wenn sich idealerweise eine gleichmäßige Fließfront eingestellt hat, wird der Harzzufluss über die Schlauchklemme so reguliert, dass das

Harz/Härter–Gemisch langsam über bzw. in den Lagenaufbau fließen kann.

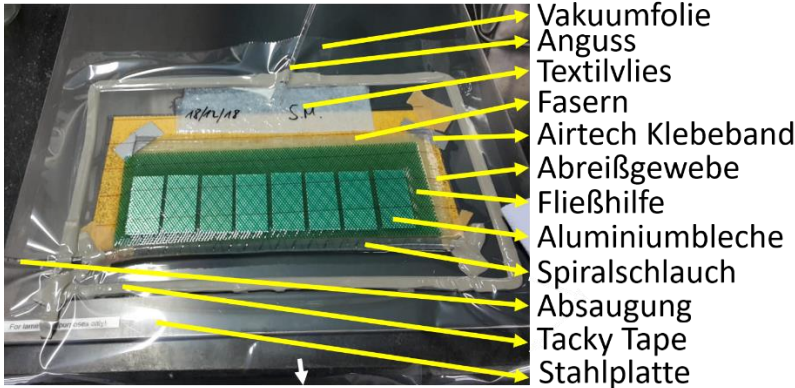


Abbildung 43: Fertiggestellter VARI Aufbau

Der Vorgang ist beendet, wenn das Gemisch an der Absaugung (von dem Textil) aufgenommen ist und sich keine Luftblasen in dieser bzw. in dem Absaugschlauch sammeln. Nach Beendigung der Infusion werden die Schlauchklemmen beidseitig geschlossen. Der fertiggestellte VARI-Aufbau (siehe Abbildung 43) härtet für min. 24 Stunden bei Raumtemperatur aus. Anschließend wird der gesamte Aufbau bei 80 °C für weitere 24 Stunden in den Ofen gegeben. Dort kommt es durch das so genannte „Tempern“ dann zur „vollständigen“ Vernetzung der Polymerketten. Nachdem die Platte aus dem Ofen entfernt und ausgekühlt ist, kann diese vorsichtig entformt werden. Über das Abreißgewebe ist dies in der Regel mit geringem Kraftaufwand möglich. Die so produzierte Platte wird beschriftet und kann der Probenpräparation zugeführt werden. Dort wird aus der Platte die benötigte Probenanzahl zugesägt. Dies geschieht mit der Präzisionssäge (DIADISC 4200, von Mutronic®) und einem passenden Diamantsägeblatt.

Die Maße der fertiggestellten Proben können aus Abbildung 44 entnommen werden.

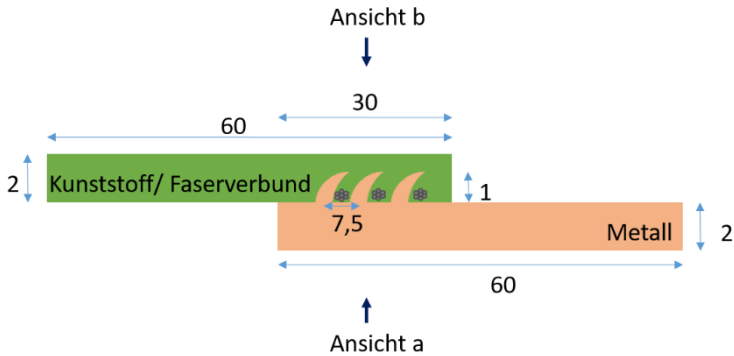


Abbildung 44: Abmaße der fertiggestellten Proben, schematisch

In Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 sind Bilder der realen Proben dargestellt. Die gelben Flecken auf den Proben sind Reste vom Trennmittel, die nicht mehr entfernbar sind, aber keinen Einfluss auf die Proben haben.



Abbildung 45: Fertiggestellte Probe
Ansicht a



Abbildung 46: Fertiggestellte Probe,
Ansicht b

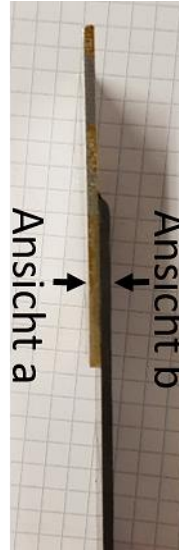


Abbildung 47: Fertiggestellte Probe,
Seitenansicht

3.2 Prüfverfahren

Nachfolgend werden die zur Charakterisierung der Hybridverbindung benutzen Prüfverfahren vorgestellt. Sämtliche Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt und erläutert.

Die Proben besitzen eine Länge von 60 mm und eine Breite von 30 mm, die Ober- und Unterteile (CKF/ GFK, Alu) der Probe sind über die halbe Länge (30 mm) über eine Verklebung (UHU® Plus Endfest, 45585, 2-Komponenten Epoxidharzkleber), eine Verzahnung oder einen HiLok Niet miteinander verbunden. Wobei die Flächen der beiden erstgenannten (30 mm x 30 mm) komplett miteinander verbunden sind, die genieteten Proben jedoch nur punktuell (die Niete sitzt in der Mitte der Probenhälfte (15 mm x 15 mm)). Dies ist bei der späteren Auswertung bzw. Deutung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

3.2.1 Zug-/ Scherprüfung

Mit dem Zug-/Scherversuch (im Folgenden als Zugversuch bezeichnet) lassen sich die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs hinsichtlich der Zugbelastung untersuchen. Die ermittelten Kenngrößen können in die Festigkeitsberechnung und Auslegung von Bauteilen einfließen. Der Versuch ist für Kunststoffe in der Norm DIN EN ISO 527-5 (62) beschrieben. Bei einem Zugversuch wird eine definierte Probe unter konstanten Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) bis zum totalen Versagen der Probe (Bruch) oder bis zum Erreichen einer vorgegebenen Kraft oder Längenänderung gedehnt. Dabei wird die Prüfgeschwindigkeit konstant gehalten, da diese einen großen Einfluss auf die Messwerte nimmt. Die Kraft wirkt in der Probe entlang der Hauptachse (Längsachse), wobei idealerweise ein einachsiger Spannungszustand (Normalspannung) erzeugt wird. Die Lasteinbringung muss stoßfrei erfolgen und langsam aber stetig steigen. Aufgrund dieser Beschränkungen bzw. Vorgaben wird der Zugversuch der statischen bzw. quasistatischen Prüfung zugeordnet.

Bei dem eigentlichen Versuch wird über die gesamte Prüfzeit kontinuierlich die Kraft F und die Längenänderung ΔL aufgezeichnet und zur Auswertung herangezogen. Mit diesen Werten lässt sich ein Kraft-Verlängerungsdiagramm bzw. ein Spannungs-/ Dehnungsdiagramm erstellen. Unter Verwendung der Probengeometrie (Querschnittsfläche und Messlänge) lässt sich ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erzeugen. Aus diesem lassen sich alle für die Charakterisierung der Probe benötigten Größen ablesen bzw. berechnen. Es sei erwähnt, dass die in dem Zugversuch aufgebrachten Kräfte und der Belastungsfall nicht zwangsläufig der Realität entsprechen. Jedoch lassen sich an diesem „Modell“ Werte wie E-Modul und Zugfestigkeit mit der dazugehörigen Dehnung bestimmen. Diese fließen in die mechanischen Berechnungen ein und dienen dazu, das Bauteil dem Belastungsfall entsprechend auszulegen. In Abbildung 48 ist beispielhaft ein Spannungs-/Dehnungsdiagramm für die drei Kunst-

stoffklassen Duomer (rot), Thermoplast (blau) und Elastomer (gelb) dargestellt.

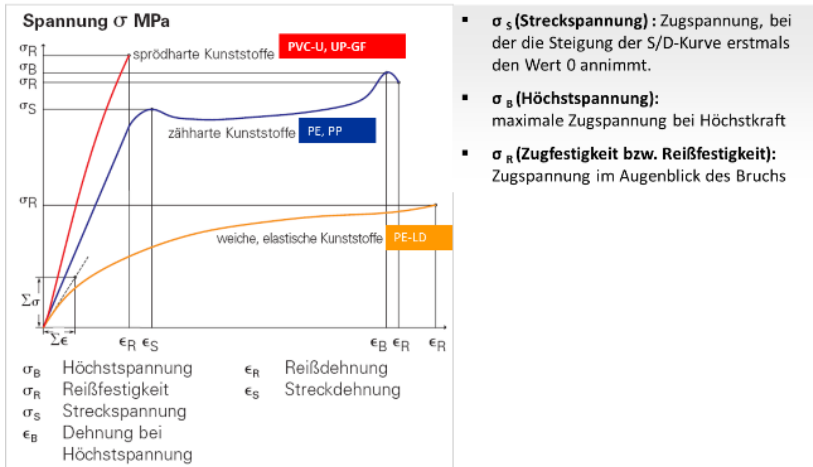


Abbildung 48: Spannungs-/Dehnungsdiagramm eines Zugversuchs für die drei Kunststoffklassen (rot=Duomer, blau=Thermoplast, gelb=Elastomer) (63)

Die Tests zu dieser Arbeit werden ein wenig modifiziert und im Folgenden näher erläutert. Die für diese Arbeit erstellten Hybridproben werden in Anlehnung an oben genannte Norm vermessen, da es aktuell keine Hybridnorm für diese Materialkombination gibt.

Die Proben (Kohle-, Glas-, Alu-Solo) werden mit einem Messschieber vermessen (Breite und Dicke) und die Kraftmessdose wird vor Beginn der Prüfung genullt. Die Probe wird zuerst in die obere Einspannung fixiert, dann wird die Kraftmessdose erneut genullt, um das Eigengewicht der Probe zu „eliminieren“. Danach wird die Probe in der unteren Einspannung fixiert. Die Probe muss gerade, das heißt zur Belastungsrichtung, ausgerichtet sein (siehe Abbildung 50), da sonst nicht der zu untersuchende Lastfall analysiert wird. Dazu sind an den Einspannbacken entsprechende Führungssysteme installiert. Die Dehnung wird bei diesen Versuchen nicht durch einen externen Längenaufnehmer (Extensiometer) oder einem Dehnmess-

streifen ermittelt, sondern über den Traversenweg. Dadurch ist die Ermittlung des E-Moduls nicht möglich. Die Messung der Längenänderung über die Traverse ist etwas ungenauer, da die Verformungen des Lastrahmens und der Spindel mitgemessen werden. Es wird die nominelle Dehnung ermittelt ($L_0 = 40 \text{ mm}$). Ein Vergleich der gemessenen Dehnung innerhalb der Messreihe ist dennoch möglich. Es ist fraglich, ob die Ermittlung der Dehnung über einem Setzdehnmesser (gerade bei den überlappenden Proben) physikalisch sinnvoll ist, denn die Fügestelle (Klebung, Vernietung, Verzahnung) dehnt sich wahrscheinlich anders aus als die homogene Probe (überlagerte Effekte). Die Messung wird gestartet und die Probe wird bis zum Bruch belastet. Vor allem zu Beginn der Messung, aber auch während der Messung, ist der Messschrieb zu beobachten. Ein mögliches Rutschen der Probe würde dann bemerkt werden, sodass die Messung frühzeitig abgebrochen werden kann. Das über die Messgrößen (Kraft und Weg) und der Probengeometrie erzeugte Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird zur Auswertung herangezogen. Zum Vergleich/Bewertung der einzelnen Fügungen wird die maximale Kraft und die dabei erreichte Längenänderung herangezogen. Je Variante werden mindestens 6 Proben gemessen.

In Abbildung 49 ist schematisch die Krafteinleitung in die Zugprobe dargestellt.



Abbildung 49: Schematische Darstellung der Krafteinleitung während der Zugprüfung

Die Parameter in der Zugprüfung sind die folgenden:

$L_0 = 40 \text{ mm}$

Vorkraft = 0,1 MPa

$v_{\text{Prüfung}} = 4 \text{ mm/min}$

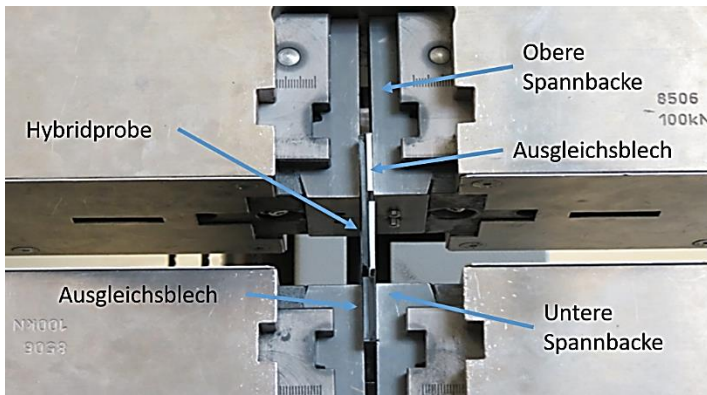


Abbildung 50: Beispiel Einspannung Zugversuch

Abbildung 50 zeigt beispielhaft eine für den Zugversuch eingespannte Hybridprobe. Diese Probe wird mittig in die Spannbacken eingespannt und entweder werden die Spannbacken versetzt, um die Probe in Richtung der Normalkraft ziehen zu können oder es werden, wie hier im Bild, Ausgleichsbleche benutzt.

3.2.2 Dreipunktbiegung

Die Dreipunktbiegung wird in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14125: 1998 (64), Verfahren A, durchgeführt. Dabei liegt der Probenkörper auf zwei Auflagern und wird mittels Druckfinne von oben belastet. Bei der Dreipunktbiegung wird über das Absenken der Druckfinne eine definierte Kraft auf die Probe aufgebracht und kontinuierlich der Weg, den diese zurücklegt, gemessen. Ein beispielhaftes Diagramm über die Kunststoffklassen Duromer (A), Thermoplast (B) und Elastomer (C) ist in Abbildung 51 aufgezeigt.

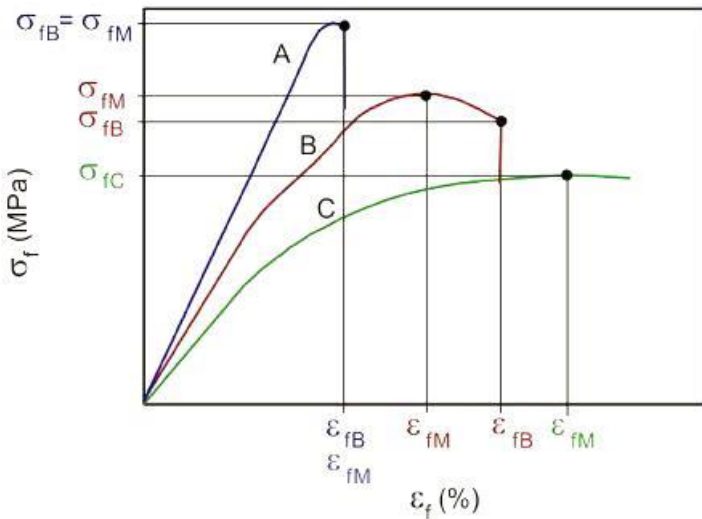


Abbildung 51: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm mittels Dreipunktbiegung für die drei Kunststoffklassen (A, blau=Duromer, B, rot=Thermoplast, C, grün=Elastomer) (65)

Die Einspannung der Hybridproben ist in Abbildung 53 dargestellt. Die Probenkörpergeometrie beträgt, wie bisher, 30 mm x 90 mm. Auf einem Bereich von 30 mm x 30 mm in der Mitte des Probenkörpers überschneiden sich Faserverbund und Aluplatte. In diesem Bereich

wird die Materialstärke des Probenkörpers vor der Versuchsdurchführung bestimmt.

Die Probenkörper werden so in die Prüfmaschine eingelegt, dass die Aluplatte unten liegt und der Faserverbund oben.

Da das Material in Klasse 2 der Norm eingeordnet werden kann, beträgt die Spannweite der Auflager 64 mm. Die Prüfungsgeschwindigkeit beträgt 4 mm/min bei einer maximalen Kraft von 100 kN.

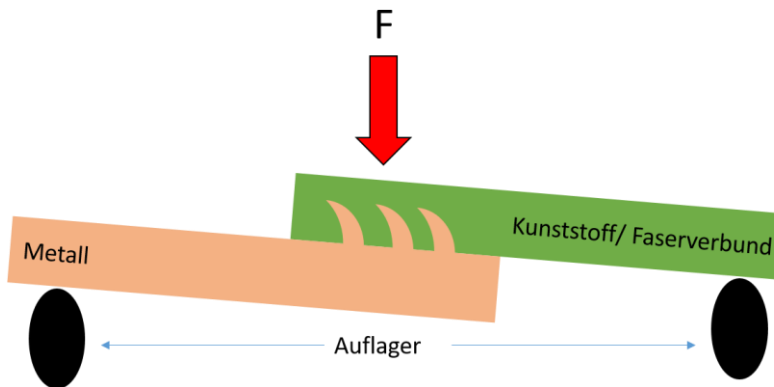


Abbildung 52: Schema der Krafteinleitung während der Dreipunktbiegeprüfung

Abbildung 52 zeigt den schematischen Aufbau der Dreipunktbiegeprüfung, Abbildung 53 zeigt den tatsächlichen Aufbau. Um sicher zu stellen, dass keine zusätzlichen Kräfte auf die Druckfläche wirken, müsste unter die Kunststoffseite ein Ausgleichsblech gelegt werden. Auf Grund von Tests wird der Einfluss des Ausgleichsbleches als gering eingestuft und daher in diesem Fall darauf verzichtet.

Bei der Dreipunktbiegeprüfung wird über das Absenken der Druckfinne eine definierte Kraft auf die Probe aufgebracht und kontinuierlich der Weg, den diese zurücklegt, gemessen.

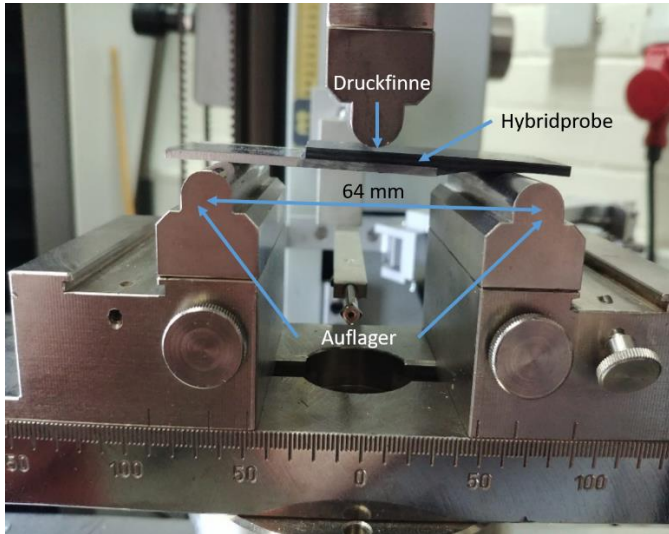


Abbildung 53: Einspannung Dreipunktbiegung

3.2.3 Interlaminare Energiefreisetzungsrate (G_{IC})

Die Energie, die zur Auslösung eines einfachen Risswachstums an einem interlaminaren Riss zwischen zwei Lagen eines Laminats erzeugt wird, wird als interlaminare Energiefreisetzungsrate bezeichnet. Abgekürzt wird diese als G_{IC} Rate bezeichnet. Das „I“ in dieser Bezeichnung steht für Mode I. Diese gibt das Verfahren an, mit dem die Last auf die Probe gebracht wird, um den Riss zu erzeugen. Der Riss dehnt sich nach Mode I senkrecht zu den zur Rissebene wirkenden Schälkräften aus. Bei der Messung der G_{IC} Rate wird eine Probe solange mit einer Schälkraft belastet, bis sich ein Riss mit einer Gesamtlänge von 100 mm ausgebildet hat. Während der Rissausbreitung werden sowohl die wirkende Last, als auch der Traversenweg der Zugprüfmaschine, aufgezeichnet, siehe Abbildung 54. Die G_{IC} Rate lässt sich anschließend über die folgende Formel berechnen.

$$G_{IC} = \frac{A_{tot}}{a \cdot w} \cdot 10^6$$

Bei der Berechnung wird die Energie A_{tot} , die zum Erreichen der Rissgesamtlänge in Joule, die Risslänge a in Millimeter und die Breite der Probe w , ebenfalls in Millimeter, einbezogen. Die G_{IC} Rate wird in Joule pro Quadratmeter angegeben.

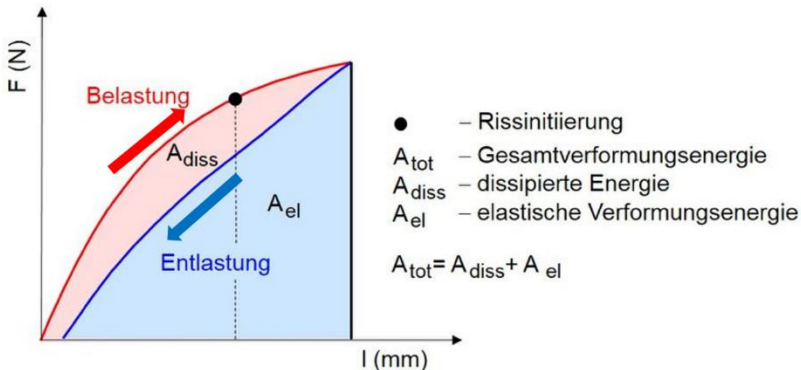


Abbildung 54: Beispiel eines Kraft-Wege-Verlaufs einer G_{IC} Messung (66)

Auf der Ober- bzw. Unterseite der Probe wird auf der nichtverklebten Fläche jeweils ein Krafteinleitungselement (Scharnier) über einen Kleber befestigt (Kleber: Araldite® AW4859/ HW4859 von Huntsman), siehe Abbildung 56. Dieser muss mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur aushärten. Anschließend wird die Probe von Kleberrückständen, vor allem an den Außenkanten der Probe, gereinigt. Andernfalls könnten diese Überreste die Messung verfälschen (sowohl beim Anriss als auch bei der eigentlichen Messung). Bei der eigentlichen Prüfung ist zu beachten, dass die Probekörper nicht der Norm entsprechen (Abmaße). Die G_{IC} -Prüfung wird in Anlehnung an DIN EN 6033 (67) durchgeführt. Anders als in dieser beschrieben, wird statt einer 250 mm langen Probe, eine 60 mm lange genutzt. Für die Prüfung werden die Proben zuerst mittels eines Messschiebers ausgemessen. An den Außenkanten der einzelnen Proben werden Markierungen aufgebracht, um die Startposition der Mes-

sungen zu markieren. Es wird, ausgehend von der Seite der Probe, an der die Scharniere befestigt sind, eine Markierung bei 30mm gesetzt. Dort beginnt die Messung. Die ersten 30 mm dienen als Anriss, damit an dem Übergang zur verklebten/strukturierten/genieteten Fläche eine Risspitze vorliegt. Die Messung wird gestartet, wenn der Riss die 30 mm Markierung erreicht und endet beim Abreißen der Klebe- bzw. Verbindungsfläche. Die Probe wird an den Scharnieren in eine Zugprüfmaschine eingespannt, hierbei ist darauf zu achten, dass die Probe gerade eingespannt ist, also einen 90° Winkel mit den Scharnieren bildet. Anschließend wird die Probe mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min belastet, bis der Anfangsriss die Markierung bei 30 mm erreicht. Ab hier wird die Messung gestartet und die Probe mit einer Traversengeschwindigkeit von 10 mm/min belastet. Der Anriss beträgt 30 mm. Hat der Riss eine Gesamtlänge von 30 mm, also ein Versagen der Probe, erreicht, wird die Messung beendet und der Probenkörper entlastet. Diese Messmethode ist nicht normgerecht, da nach dieser die Probe nicht bricht bzw. reißt. Dies ist jedoch bei der gewählten Probengeometrie nicht möglich. Abbildung 55 zeigt den schematischen Aufbau der G_{1C} Messung zur interlaminaren Energiefreisetzungsrate. Es wurden außerdem Beispielbilder vor und während des Versuches aufgenommen. Diese sind in Abbildung 56 und dargestellt.

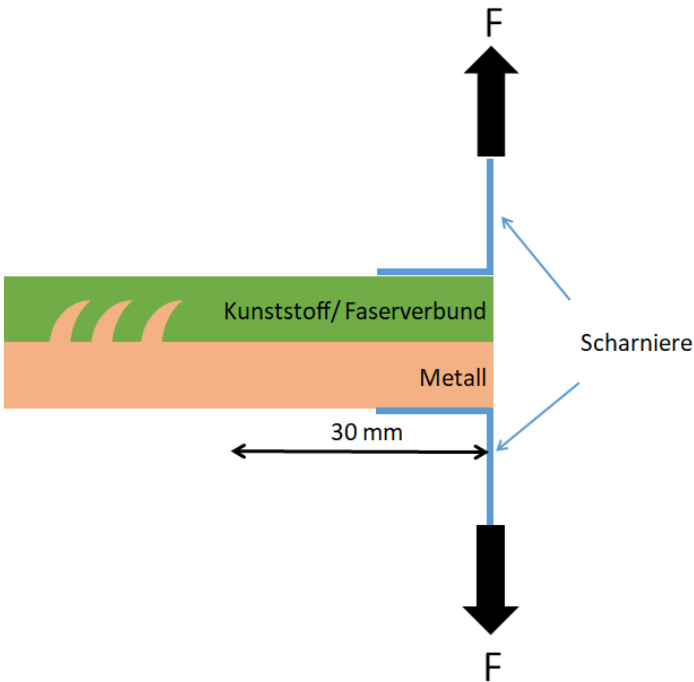


Abbildung 55: Schema der Krafteinleitung während der Messung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates

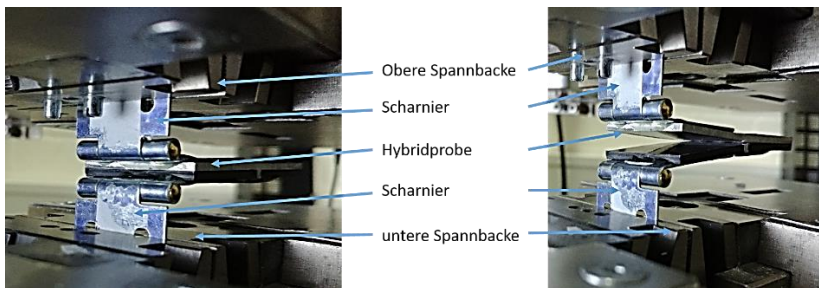


Abbildung 56: Beispiel einer eingespannten, strukturierten CFK Probe, links vor der Prüfung, rechts während der Prüfung

Hier ist der Rissfortschritt zwischen den beiden Materialien mit zunehmender Kraft und zunehmendem Weg zu erkennen.

3.2.4 Faservolumengehalt

Um die Qualität der Kunststoffkomponente der Hybridproben charakterisieren zu können, wird der Faservolumengehalt der CFK-Proben in Anlehnung an DIN EN 2564: 1998 Verfahren B bestimmt.

Die dazu verwendeten Probenkörper haben eine Größe von 20 mm x 10 mm x 2 mm.

Die Probenkörper werden über Nacht bei 80 °C getrocknet und kühlen anschließend im Exsikkator aus. Danach werden sie gewogen (m_1), ihre Dichte (ρ_c) bestimmt.

Die getrockneten Proben werden in Rundkolben in 20 ml konzentrierter Schwefelsäure eingebracht und für vier Stunden im Ölbad auf 120 °C erhitzt. Anschließend kühlt die Lösung über Nacht ab und dann werden 25 ml Wasserstoffperoxid Lösung (Konzentration 300g/l) sehr langsam hinzugegeben. Die Lösung wird erneut für etwa zwei Stunden im Ölbad auf 120 °C erhitzt und im Anschluss auf Raumtemperatur abgekühlt.

Der Inhalt jedes Kolbens wird in ein Becherglas mit 100 ml destilliertem Wasser gegossen und die am Kolben haftenden Fasern werden mit Hilfe eines Glasstabs und destilliertem Wasser in das Becherglas gespült.

Der Inhalt des Becherglases wird mit Hilfe von Vakuum durch einen getrockneten und gewogenen (m_2) Glasfiliertiegel der Durchlässigkeit 3 filtriert und mit destilliertem Wasser gewaschen. Anschließend wird der Inhalt des Filtertiegels mit Aceton gespült.

Die Filtertiegel werden bei 120°C für mindestens 45 min getrocknet, anschließend für mindestens 20 min im Exsikkator abgekühlt und gewogen (m_3).

Der Faservolumenanteil (V_f) kann dann bestimmt werden durch

$$V_f = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1} * \frac{\rho_c}{\rho_f}$$

Dabei ist:

- V_f Der Faservolumenanteil. In Prozent des ursprünglichen Volumens
- m_1 Die Ausgangsmasse des Probenkörpers, in Gramm;
- m_2 Die Masse des Glasfiltertiegels, in Gramm;
- m_3 Die Masse des Glasfiltertiegels und der Fasern, in Gramm;
- ρ_c Die Dichte des Probenkörpers, in Gramm pro Kubikzentimeter;
- ρ_f Die Dichte der Fasern, in Gramm pro Kubikzentimeter.

Grundsätzlich wird ein gleichbleibender Faservolumengehalt angestrebt um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Mit dem hier verwendeten VARI Prozess sind Faservolumengehalte um die 50 % üblich.

3.2.5 Mikroskopische Analyse der Verbindungsqualität

Um die tatsächliche Verbindungsqualität beurteilen zu können, werden von einigen Proben Schliffe erzeugt und diese unter dem Digitalmikroskop (Keyence, VHX 500F) analysiert.

Für eine optische Analyse der Verbindung zwischen Kunststoff- und Metallkomponente müssen Kriterien festgelegt werden. Zum einen ist es wichtig, dass eine maximale Faseranzahl im Sinne des Faservolumengehaltes unter die Strukturen greift zum anderen dürfen keine Hohlräume sichtbar sein. Die Fasern müssen beim Infudieren komplett mit Harz getränkt worden sein. Ebenso dürfen keine artfremden Stoffe im Kunststoff eingeschlossen sein.

3.3 Referenzverbindungen

Für einen angemessenen Vergleich werden experimentelle Daten von Referenzverbindungen generiert. Diese Referenzen werden in Kap. 4.1.2 näher erläutert.

Als Referenzen werden herangezogen:

- Monolithische Materialien (diese Bezeichnung ist in Bezug auf die faserverstärkten Kunststoffe nicht korrekt, wird aber der Übersichtlichkeit halber hier verwendet)
- Nietverbindungen mit HiLok
- Adhäsionsverbindungen
- Sandgestrahlte Metallkomponenten

4 Experimentelle Untersuchungen: Ergebnisse und Auswertung

Jede geprüfte Serie besteht aus mindestens sechs Proben. Hergestellt wurden insgesamt zehn Proben. Somit wurden mindestens drei Proben für eventuelle weitere Tests zurückgehalten. Neben dem arithmetischen Mittelwert ist ebenso die Standardabweichung mit angegeben. Im Säulendiagramm ist jeweils die maximal übertragene Kraft der jeweiligen Serie dargestellt.

Zur besseren Übersicht in den Diagrammen wurden spezielle Bezeichnungen der geprüften Serien benutzt, die in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2: Serienbezeichnungen und ihre Bedeutung

Bezeichnung Serie im Diagramm	Erklärung
Grundlegende Untersuchungen	
Vlies	Glasfaservlies
Körpergewebe	Glasfasergewebe mit Körperbindung
PA6	Hybridprobe aus Aluminium 2017 und Polyamid 6
PA6GF30	Hybridprobe aus Aluminium 2017 und Polyamid 6 mit 30 % Kurzglasfaserverstärkung
GMT	Glasfasermattenverstärktes Thermoplasthalbzeug, „Organoblech“
Referenzverbindungen:	
Alu Norm	Normgerechte Zugprobe aus Aluminium 2017
Alu solo	Monolithisches Aluminium 2017
Alu HyT	Monolithisches, strukturiertes Aluminium 2017
G solo	„Monolithisches“ GFK
C solo	„Monolithisches“ CFK
G solo Norm	Normgerechte Zugprobe G solo
C solo Norm	Normgerechte Zugprobe C solo
C Niet	Genietete Metall-CFK Verbindung
C Kleb	Geklebte Metall-CFK Verbindung
C Sand	Sandgestrahlte Metallkomponente verklebt mit CFK
Strukturierte Hybridverbin-	

Bezeichnung Serie im Diagramm	Erklärung
dung:	
G HyT	Strukturierte Metallkomponente verbunden mit GFK
C HyT	Strukturierte Metallkomponente verbunden mit CFK
C HyT Sand	Strukturierte, sandgestrahlte Metallkomponente verbunden mit CFK
Überprüfung Testbedingungen:	
C zentriert	Strukturierte Metallkomponente verbunden mit CFK; Spannbacken im Zugversuch zentrisch angeordnet, sodass die Probe schief eingespannt ist
C versetzt	Strukturierte Metallkomponente verbunden mit CFK; Probe wurde im Dreipunktbiegeverfahren um eine Reihe versetzt auf den Auflagern abgelegt

4.1 Zugversuch

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Zugversuches dargestellt. Die Grundlagen der Prüfung wurden bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellt und erläutert.

Um die Materialien, die für die Hybridverbindung geeignet sind, identifizieren zu können, wurden zunächst einige grundlegende Versuche unternommen. Auf Basis dieser Ergebnisse sind das Fasermaterial, die Webarten und der verwendete Kunststoff festgelegt worden.

4.1.1 Grundlegende Untersuchungen

Innerhalb erster Versuche wurde analysiert, welche Art von Fasern am besten für diese innovative Verbindung geeignet sind. Grundsätzlich sind technische Fasern für diese Art von Einsatz, also in Verbindung mit Metall unter Zug- und Druckbeanspruchung, geeignet. Gerade die Kohlenstofffaser besitzt die größte Zugfestigkeit in Faserrichtung. Da in diesem Anwendungsfall die Kräfte aber nicht ausschließlich entlang der Faserrichtung übertragen werden, wurde auch eine Faserart ausgewählt, die elastischere Eigenschaften im Sinne eines niedrigeren E-Moduls aufweist: die Glasfaser. Die durchschnittlichen Eigenschaften dieser Fasern sind in Tabelle 3 mit anderen Materialien vergleichend dargestellt.

Tabelle 3: Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe nach (68)

Werkstoff	Dichte g/cm ³	Zugfestigkeit GPa	Zug-E-Modul GPa	Lineare Dehngrenze %	Reißlänge km
Stahl	7,8	1,8 - 2,2	210	1,4 - 1,7	max. 30
Glasfasern	2,6	1,8 - 3,0	72 - 83	2 - 3	70 - 120
Kohlenstofffasern	1,7 - 1,9	2,4 - 7,0	230 - 700	0,5 - 2,3	150 - 380
Aramidfasern	1,4 - 1,5	2,3 - 3,5	60 - 130	2,0 - 4,0	180 - 240
HPPE	0,97	2,7	89	3,5	295
Flachs	max. 1,5	max. 0,85	max. 25	1,4 - 4	max. 60
Jute	max. 1,5	0,32	27	2,5	max. 25
Ramie	1,5	max. 0,9	max. 24	2,5	max. 61
Baumwolle	1,5	max. 0,75	max. 9	max. 10	max. 50

Um herauszufinden, welche Webarten hinsichtlich Verarbeitung und maximaler Kraftübertragung in Frage kommen, wurden Gewebe, Gelege und ein Vlies getestet. Dabei fällt bei der Verarbeitung schon auf, dass sich das Gelege sehr gut unter die Strukturen drapieren lässt. Sowohl beim **Köpergewebe** als auch beim **Vlies** ist es kaum möglich viele Fasern unter den Strukturen abzulegen. Ebenfalls ist nach den Zugversuchen aufgefallen, dass mit dem unidirektionalen Gelege (G solo) die höchsten Kräfte übertragen werden können (siehe Abbildung 57). Das unidirektionale Gelege (**G solo**) wurde in Richtung der Zugbeanspruchung ausgerichtet, insofern entspricht das Ergebnis den Erwartungen.

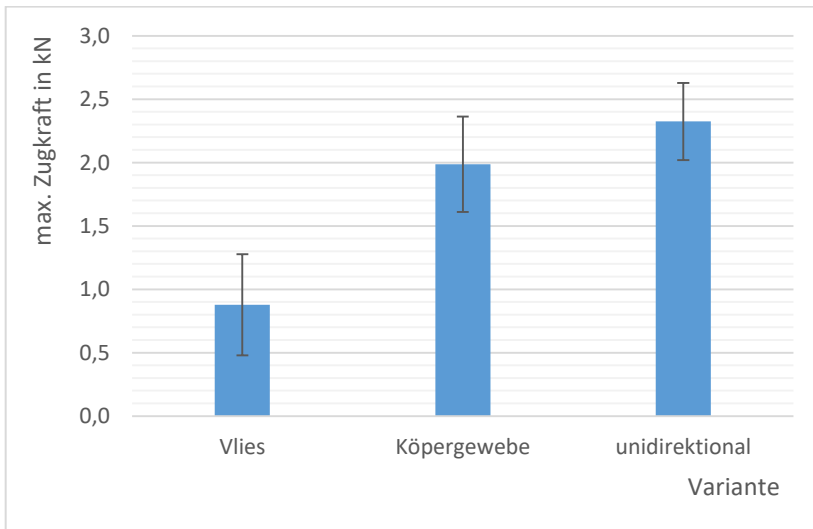


Abbildung 57: Vergleich der eingesetzten Faservarianten, hier im Beispiel mit Glasfasern im Zugversuch

Aufgrund dessen wurden für die nachfolgenden Versuche unidirektionale Fasern, sowohl bei den Glas- als auch den Kohlenstofffasern verwendet.

Ebenso sind Versuche auch mit Hybridproben mit dem Thermoplasten Polyamid 6 (PA6) im Spritzgußverfahren durchgeführt worden. Das Ziel war, das VARI Verfahren mit einem automatisierten, serientauglichen Spritzgußverfahren zu vergleichen und zu bewerten. Dabei kam sowohl das monolithische **PA6** als auch PA6 mit 30 % Kurzfasern (**PA6GF30**) zum Einsatz. Des Weiteren wurden im Heißpressverfahren auch Hybridproben mit **GlasfaserMattenverstärktem Thermoplasthalbzeug (GMT**, auch bekannt als „Organoblech“) als konventionell eingesetztes Umformverfahren, hergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 58 zu sehen.

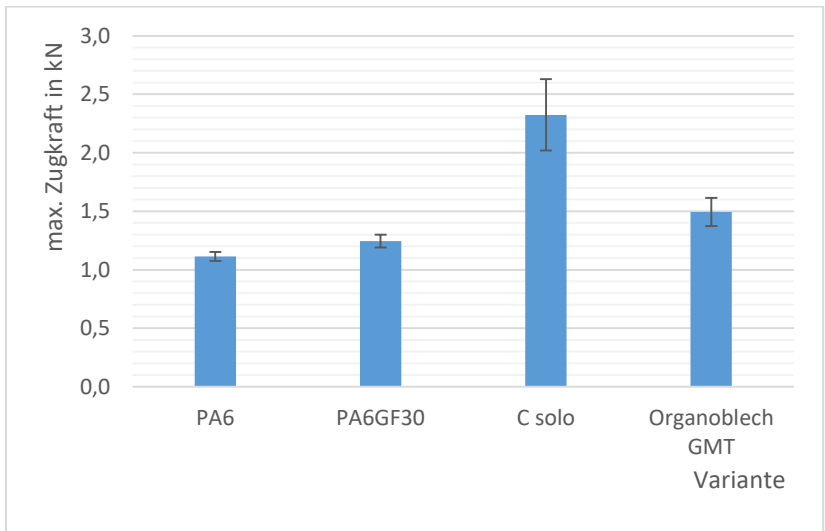


Abbildung 58: Zugversuche mit Hybridproben bestehend aus Aluminium und PA6, PA6GF30 und GMT im Vergleich mit kohlenstofffaserverstärkten Proben in 0/90° Ausrichtung

Die im Spritzgußverfahren hergestellten Proben weisen eine relativ geringe Standardabweichung auf, da die Proben durch die Automatisierung eine große Reproduzierbarkeit aufweisen. Die Räume unter den Strukturen sind komplett mit dem Thermoplast gefüllt, siehe

Abbildung 59. Insofern greift der Kunststoff optimal unter die Strukturen. Die Kurzfasern im PA6GF30 orientieren sich hauptsächlich entlang der Fließrichtung im Spritzgußverfahren. Wenige Fasern greifen jedoch hinter die Strukturen und sorgen so dafür, dass die Kraftübertragung vergrößert werden kann.

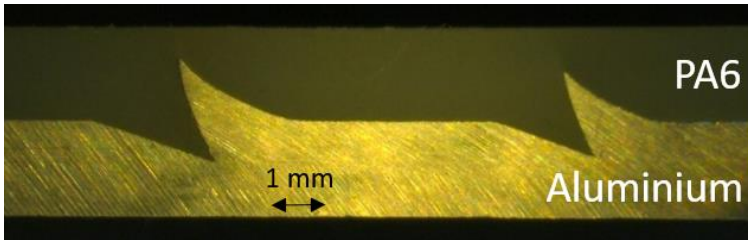


Abbildung 59: Schnittbild einer Hybridprobe mit Thermoplast PA6, 20fache Vergrößerung

Wie schon in Kapitel 3.2.1 gezeigt, haben Thermoplaste und Duromere ein definiertes Versagensverhalten. Wie erwartet, konnte mit einem Duromer mehr Kraft übertragen werden. Obwohl mit den automatisierten Verfahren Zeit und Kosten eingespart werden, wird das händische Verfahren bevorzugt, da das Hauptaugenmerk auf der maximal möglichen Kraftübertragung der Verbindung liegt. Bei der thermoplastischen Matrix wird nur ca. die Hälfte der maximalen Kraft von dem hier verglichenen kohlenstofffaserverstärkten Duromer übertragen. Wie ebenfalls erwartet liegt das umgeformte Organobleich zwischen den anderen beiden getesteten Verbindungen. Auf Grund dieser Resultate wurde das VARI Verfahren ausgewählt und auf die automatisierbaren Verfahren mit thermoplastischer Basis verzichtet. Eine automatisiertes Verfahren hat selbstverständlich einen großen Stellenwert in der Industrie, ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeit. Somit wird faserverstärkter Kunststoff auf Duromerbasis mit unidirektionalem Gelege ausgewählt. Es kamen dabei neben den Kohlenstofffasern auch Glasfasern zum Einsatz.

4.1.2 Referenzverbindungen

Im Folgenden werden die Versuche vorgestellt, die als Referenzen dienen, um die neu entwickelte formschlüssige Verbindung hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit einordnen zu können. Dabei wurde auf konventionelle Methoden, wie dem Nieten und dem Kleben, zurückgegriffen. Da diese Methoden in der Industrie etabliert sind, eignen sie sich besonders als Referenzverbindungen.

Neben den konventionellen Herstellungsmethoden wurde auch auf eine konventionelle Methode zum Abrunden scharfer Kanten, bzw. Vergrößern der Oberfläche zurückgegriffen: Sandstrahlen.

4.1.2.1 „Monolithische“ Materialien

Als monolithische Materialien kamen sowohl das verwendete Aluminium als auch die GFK bzw. CFK Komponente zum Einsatz. Strenggenommen ist weder GFK noch CFK monolithisch, da es aus zwei verschiedenen Werkstoffen, den Fasern und der Matrix, besteht. Da aber sowohl CFK als auch GFK konventionell als ein Werkstoff eingesetzt werden, wird es hier als monolithisch bezeichnet. Diese Materialien wurden ebenfalls den gleichen Tests unterzogen wie die Hybridverbindung. In den nachfolgenden Kapiteln sind in den Diagrammen zur besseren Übersicht neben der zu charakterisierenden Verbindung ebenfalls die Referenzverbindungen eingetragen.

4.1.2.1.1 Metallseite Aluminium AlCuMg1-2017

Hier sind Bilder der Tests mit der monolithischen Metallkomponente dargestellt. Diese Komponente wurde, ebenfalls wie die Hybridverbindungen, einzeln den gleichen Tests unterzogen.

Um die Messergebnisse mit der hier verwendeten Geometrie mit einer normgerechten Messung zu vergleichen, wurden ebenfalls normgerechte Zugproben (vgl. Abbildung 60 **Alu Norm**) aus dem Metall hergestellt und im Zugversuch DIN EN ISO 6892-1 (69) getestet.



Abbildung 60: Getestete, normgerechte Zugprobe des Aluminium 2017

Die Ergebnisse sind ähnlich und in Abbildung 61 dargestellt. Daher wird angenommen, dass es legitim ist, statt der normgerechten Zugprobe die hier verwendete Geometrie als Referenz zu nutzen. Diese Probenserie heißt **Alu solo** (siehe Tabelle 2).

Auffällig ist auch, dass die strukturierten Proben weniger Kraft übertragen können als die anderen beiden Proben. Das liegt darin begründet, dass das Aluminiumblech durch die Kaltumformung im Strukturierungsprozess eine oberflächliche Schädigung erfahren hat.

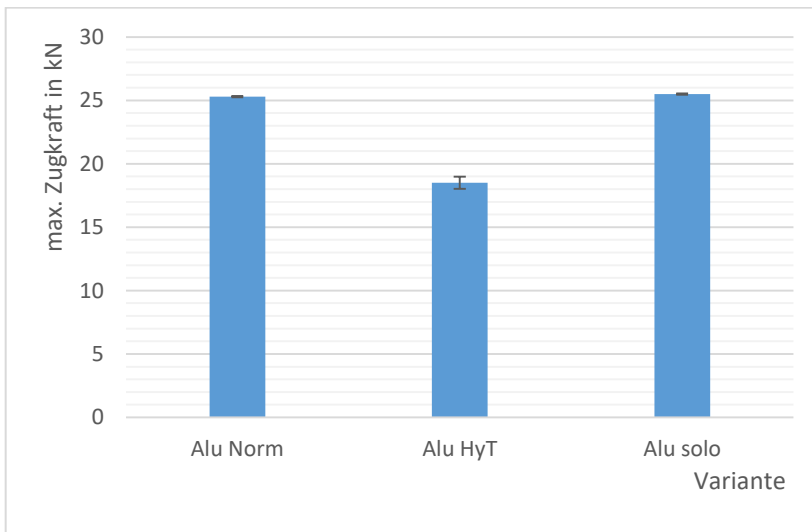


Abbildung 61: Vergleich der monolithischen Aluminiumproben im Zugversuch

Ebenso sind die strukturierten Proben unter Zugbelastung (Abbildung 62) und unter Biegung, siehe 3.2.2, getestet worden: Beim Zugversuch versagten die Proben immer entlang einer strukturierten Reihe. Dieses Versagen wurde erwartet, da die Proben an dieser Stelle durch die Strukturierung, ähnlich einer Perforierung, geschädigt werden. Auffällig ist, dass diese Proben, bezeichnet mit **Alu HyT** (siehe Tabelle 2) immer an der ersten strukturierten Reihe versagen, da dort die Krafteinleitung als erstes angreift, bevor sie auf die nachfolgenden Reihen trifft.

Auf die Ergebnisse der Zug-, Biege- und G_{1C} -Versuche wird in den Kapiteln 4.1.3, 4.2 und 4.3 näher eingegangen.



Abbildung 62: Zugversuche monolithische, strukturierte Aluminiumprobe

4.1.2.1.2 Kunststoffe

Ebenso wurden die Kunststoffe einzeln getestet. In Abbildung 63 ist beispielhaft ein Bild der getesteten Proben dargestellt. Die Bilder dienen als Beispiel und es wurden sowohl die CFK als auch die GFK Proben den Zug-, Biege- und G_{1C} Versuchen unterzogen. Auf die Ergebnisse wird in den Kapiteln 4.1.3, 3.2.2 und 3.2.3 näher eingegangen.

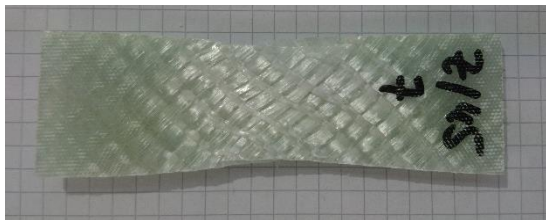


Abbildung 63: Zugversuch GFK (G solo)

Die hier verwendeten Namen für die Probenserien lauten: **G solo** und **C solo** (siehe Tabelle 2).

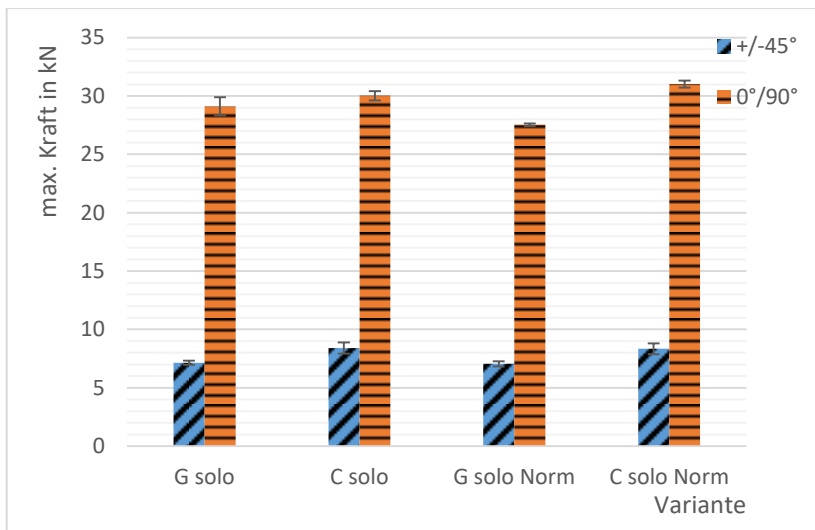


Abbildung 64: Vergleich der hier verwendeten Geometrie (G solo, C solo) mit der Probengeometrie nach Norm

Wie in Kapitel 4.1.2.1.1 bereits die Geometrie der Aluminiumprobe mit der Normprobe verglichen wurde, ist hier ebenfalls ein Vergleich der hier verwendeten Geometrie mit der aus der Kunststoffnorm DIN EN ISO 527-5 (62) dargestellt. Die Normproben weisen eine Geometrie von 250 mm x 25 mm x 2 mm auf, während die hier verwendete Geometrie 60 mm x 30 mm x 2 mm Probengröße aufweist. Die Ergebnisse sind, wie erwartet, nicht identisch, aber immerhin in ähn-

licher Größenordnung. Da die in dieser Arbeit verwendete Geometrie um 5 mm breiter als die Normprobe ist, ist die Maximalkraft etwas höher als die der Normprobe. Anhand dieser Ergebnisse wird angenommen, dass die hier verwendete Geometrie ähnliche Ergebnisse in der maximalen Kraft generiert.

4.1.2.2 Genietete Verbindung (Kraftschluss)

Um eine adäquate industrielle Hybridverbindung als Referenz benutzen zu können, wird die Nietverbindung herangezogen. Allerdings handelt es sich bei dieser Verbindung nicht um eine klassische Nietverbindung, sondern um eine Schraubnietverbindung mit HiLoks (Hi-Shear Corporation). Diese Niete werden von Airbus für Fail/Safe-Anwendungen benutzt. Sie sind aus Titan. Ein Abscheren des Schraubkopfes garantiert das Anziehen mit einem definierten Drehmoment von 18 Nm. Die Niete und die Verbindung der Nietreferenzproben sind in Abbildung 65 bis Abbildung 69 dargestellt.



Abbildung 65:
Netteile



Abbildung 66:
Nietverbindung

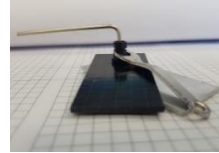


Abbildung 67:
Befestigen der
Nietverbindung

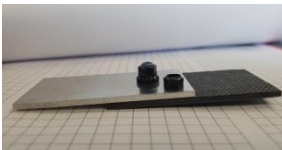


Abbildung 68: Abscheren
des Schraubkopfes



Abbildung 69:
Fertiggestellte
Nietverbindung

Abbildung 65 bis Abbildung 69 zeigen die HiLok Niete und die Herstellung der Referenzproben.

In industriellen Anwendungen werden zur Verbindung zweier Komponenten meistens mehrere Niete benutzt. Um in diesem Fall ähnliche Voraussetzungen miteinander zu vergleichen, wird ein Niet auf der Überlappungsfläche eingebracht. Somit ergibt sich eine ähnlich große Belastungsfläche wie bei den Strukturen, um die Kraft übertragen zu können.

Diese Serie ist mit **C Niet** gekennzeichnet (siehe Tabelle 2). Die Ergebnisse werden mit den anderen im Vergleich unter Kapitel 4.1.3 diskutiert.

4.1.2.3 Geklebte Verbindung (Adhäsion)

Eine andere industriell verwendete Methode, zwei verschiedene Werkstoffe miteinander zu verbinden, ist das Kleben. Dies ist ebenso bei verschiedenen Werkstoffgruppen, wie Metall und Kunststoff, möglich. Hier wurde dazu der Klebstoff 45585 der Firma Uhu benutzt.

Dabei handelt es sich um einen Epoxidharzkleber mit zwei Komponenten, dessen Klebewirkung auf Adhäsion beruht.

Um die neu entwickelte formschlüssige Verbindung einordnen zu können, wurde bei den Klebproben die Überlappungsfläche von 30 mm x 30 mm zusammengeklebt, siehe Abbildung 70.

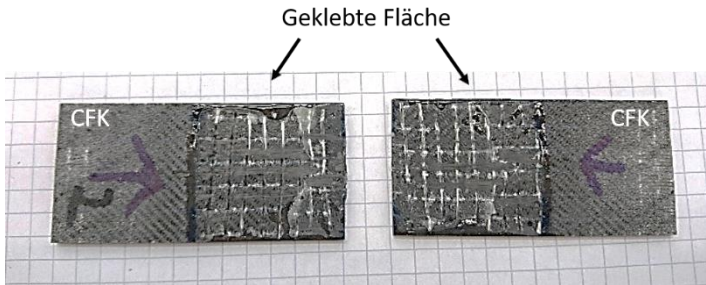


Abbildung 70: Beispiel getestete, geklebte CFK Probe

Diese Probenserie trägt den Namen **C Kleb** (siehe Tabelle 2). Die Ergebnisse werden mit den anderen im Vergleich unter Kapitel 4.1.3 diskutiert.

4.1.2.4 Sandgestrahlt

Außerdem wurden als Referenz sandgestrahlte Proben hergestellt. Dabei sind die strukturierten Bleche eine Minute mit Korund 150 auf der Überlappungsfläche behandelt und ebenfalls mit dem VARI Verfahren belegt worden.

Dieser Prozessschritt wird zusätzlich eingeführt, um den Herstellungsprozess zu optimieren, denn die Strukturen sind nach der Herstellung scharfkantig und schneiden einen Teil der Fasern im VARI Prozess durch. Um dies zu verhindern, wird die Oberfläche gesandstrahlt. Dadurch werden die Strukturen abgerundet und keine Fasern mehr durchtrennt. Ein positiver Nebeneffekt ist die Vergrößerung der Oberfläche, die die adhäsive Wirkung des Harzes begünstigt.

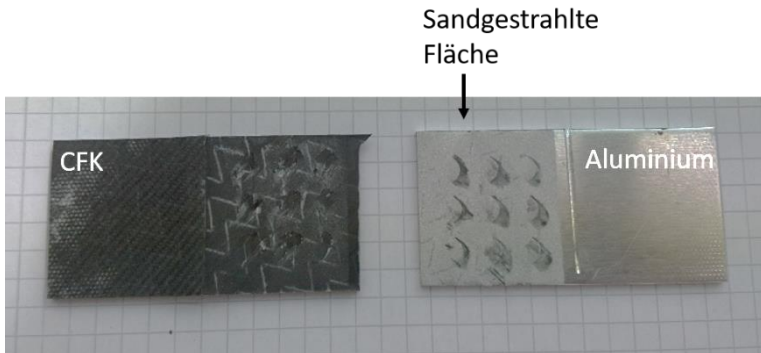


Abbildung 71: Beispiel getestete, sandgestrahlte Zugprobe CFK

Diese Serie ist unter **C Sand** in Tabelle 2 zu finden. Die Ergebnisse werden mit den anderen im Vergleich unter Kapitel 4.1.3 diskutiert.

Die Optimierung der strukturierten Proben wird in Kapitel 4.1.3.2 analysiert.

4.1.3 Vergleich der getesteten Serien

Die in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Referenzverbindungen sowie die neue Hybridverbindung in Kombination mit Kohlenstofffasern, **C HyT** (Tabelle 2), sowie Glasfasern, **G HyT** (Tabelle 2), sind in Abbildung 72 dargestellt. Hier ist die durchschnittlich maximal auftretende Kraft der getesteten Serien im Zugversuch angegeben.

Zu sehen ist, dass die maximale Kraftübertragung der monolithischen Aluminiumprobe ca. 20 % besser ist, als die der strukturierten Probe. Das liegt darin begründet, dass beim Strukturieren der Probe das Material eine Art Vorschädigung durch den Kaltumformprozess erfährt. Ebenso nimmt die Materialstärke an den Stellen der Strukturen ab. Dadurch kommt es an dieser Stelle auch zum Versagen der Proben, siehe Abbildung 62.

Wie zu erwarten hat die kohlenstofffaserverstärkte Serie am meisten Kraft mit ca. 30 kN übertragen und liegt im Durchschnitt knapp über dem Ergebnis der glasfaserverstärkten Serie. Allerdings muss hier

angemerkt werden, dass eine Probe als ungültig erklärt wurde und nicht in die Auswertung miteingeflossen ist. Diese Probe ist während der Zugprüfung aus den Spannbacken gerutscht und konnte somit nicht korrekt vermessen werden.

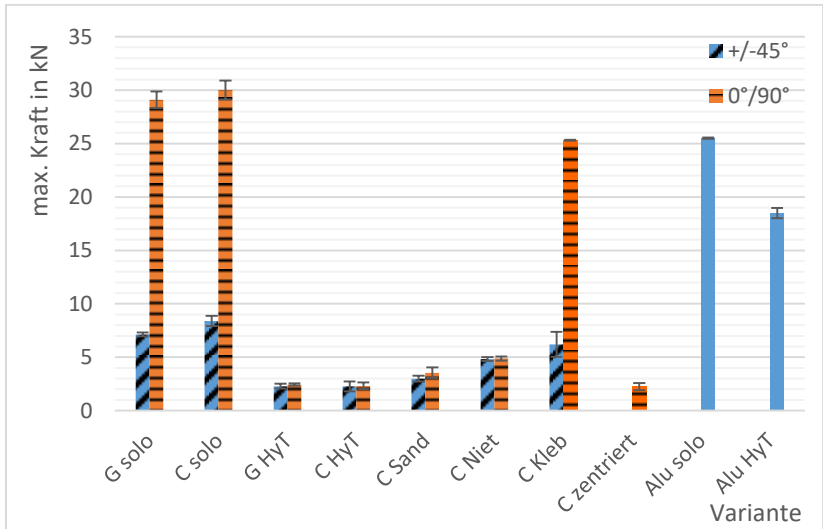


Abbildung 72: Max. Zugkraft

Auffällig ist, dass die Klebverbindung mehr als dreimal so viel Kraft übertragen hat wie die genietete Verbindung. Dabei ist zu erwähnen, dass die Kraftabschaltsschwelle bei 80 % der Maximalkraft liegt und nicht beim Komplettersagen der Verbindung. Das bedeutet, wie zu erwarten, dass der Niet nicht oder nicht vollständig gebrochen ist, sondern der Kunststoff an der Bohrungsstelle versagt hat (siehe Abbildung 73). Die geklebten Proben hingegen wiesen ein Komplettersagen auf, siehe Abbildung 70. Werden allerdings die Flächen, auf die die Kräfte wirken, verglichen, würde die Nietverbindung bessere Ergebnisse als die geklebte Variante erzielen. Denn die kraftübertragende Fläche beträgt 900 mm² bei der Klebverbindung und ca. 18 mm² für die Nietverbindung. Somit beträgt die Fläche nur ca. 2 % von der Klebverbindung. Da es hier aber hauptsächlich um die Einordnung der neuen Hybridverbindung gehen soll, wird auf eine

nähere Untersuchung der Kleb- und Nietverbindung verzichtet, zumal bei beiden unterschiedliche Gestaltungsanforderungen zu Grunde liegen. Ein Vergleich der maximalen Spannungen zwischen der Hybridverbindung und der Nietverbindung wird in Kapitel 4.6 diskutiert.

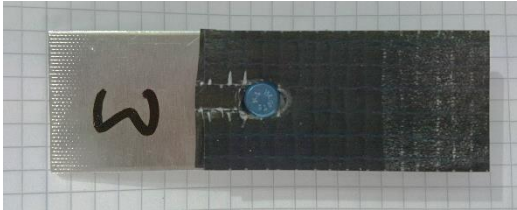


Abbildung 73: Getestete CFK Nietverbindung im Zugversuch

Des Weiteren fällt auf, dass die neue Verbindungsmethode „HyT“ die geringste Kraft überträgt. Allerdings gilt für das Versagen das Gleiche wie schon für die genieteten Proben. Die Proben halten nach der Prüfung noch zusammen. Allerdings können die Proben nach der Prüfung händisch entgegengesetzt der Zugrichtung, also unter Druck, einfach auseinandergeschoben werden.

In Bezug auf die Faserausrichtung lässt sich grundsätzlich feststellen, dass, wie erwartet, bei den monolithischen FVK-Proben jene Proben am meisten Kraft übertragen haben, die eine Faserlage in Zugrichtung enthielten, also die mit einer $0/90^\circ$ Ausrichtung. In Bezug auf die HyT Proben hat die Faserausrichtung tendenziell keine Auswirkung, siehe Abbildung 76, da die Standardabweichungen überlappen. Die maximalen Kräfte liegen alle in einer Größenordnung um ca. 2200 N.

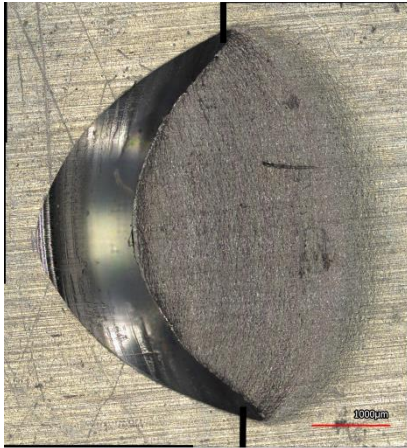


Abbildung 74: Beispiel 0/90°
Faserablage hinter einer Struktur

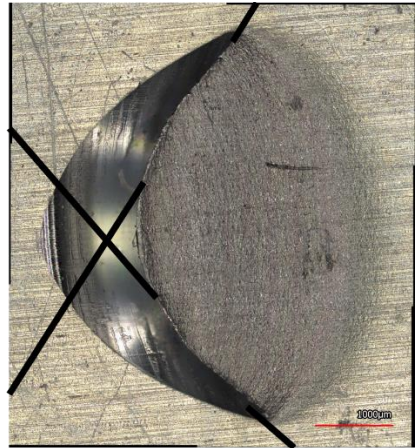


Abbildung 75: Beispiel +/-45°
Faserablage hinter einer Struktur

Das liegt zum Teil daran, dass bei den 0/90° Proben nur die erste Lage unter die Strukturen greifen kann (siehe Abbildung 74). Bei den +/-45° Proben sind es zwar zwei Lagen, die unter die Strukturen greifen, aber um 45° versetzt. Somit kann wieder der volle Raum nicht ausgenutzt werden, es bleibt ein Dreieck hinter den Strukturen frei (siehe Abbildung 75).

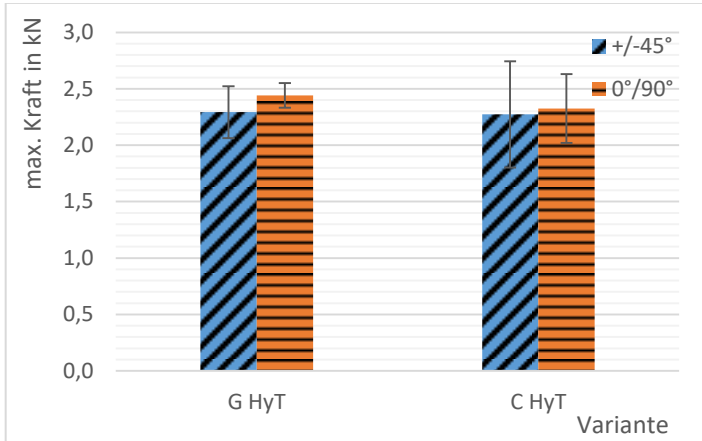


Abbildung 76: Vergleich der HyT Proben

Bei den 0/90° Proben greifen nur die Fasern unter die Strukturen, die in 90° angeordnet sind. Damit sind sie die alleinigen Kraftüberträger. Diese Fasern greifen sehr gut unter die Strukturen, liegen dafür aber um 90° versetzt zu der Richtung, in die sie die größten Kräfte übertragen können: die Längsrichtung. Der weiße, mit „Fläche Roving“ bezeichnete, Kasten kennzeichnet die Fläche, die mit Fasern ausgefüllt werden kann. Eine Faserablage unterhalb dieses Kastens ist nicht möglich, da der Strukturierungsvorgang einen Hohlraum im Blech erzeugt.

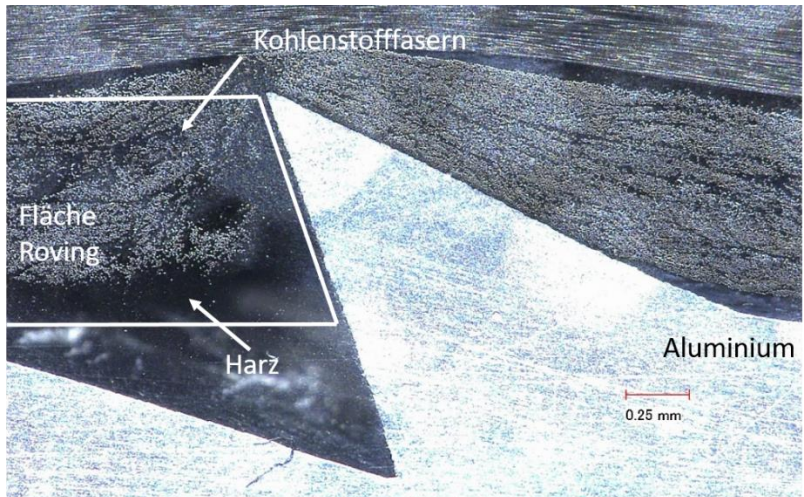


Abbildung 77: Mikroskopiebild mit C Fasern in 0/90° Richtung. Vergrößerung 100x

Bei den $\pm 45^\circ$ Proben können beide Faserlagenausrichtungen unter die Strukturen greifen und liegen um 45° versetzt zur optimalen Kraftübertragungsrichtung der Fasern. Es gibt allerdings ein paar ungefüllte Räume sowie Unregelmäßigkeiten.

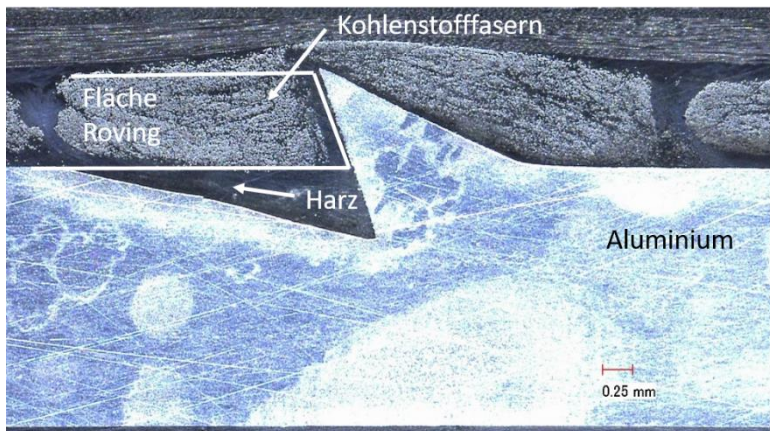


Abbildung 78: Mikroskopiebild mit C Fasern in $\pm 45^\circ$ Richtung. Vergrößerung 30x

Diese beiden Faserausrichtungen von $0/90^\circ$ und $\pm 45^\circ$ übertragen somit ähnlich große Kräfte. Die negativen und positiven Eigenschaften beider Proben liefern in Summe die gleichen Ergebnisse. Vergleiche dazu auch die Darstellungen in Abbildung 74 und Abbildung 75.

Ebenso macht es keinen Unterschied, ob die Proben zur Normalkraft versetzt oder gerade eingespannt werden. Die Proben haben nach der Herstellung einen Versatz, siehe Abbildung 79.

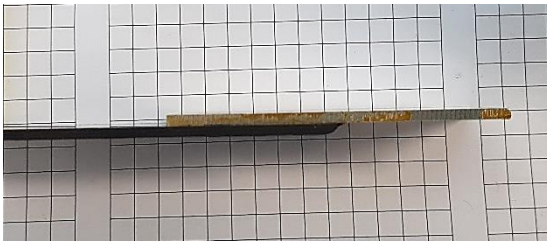


Abbildung 79: Seitenansicht Probe HyT

Um die Proben in Normalkraftrichtung in der Zugprüfung zu testen, wurden die Spannbacken der Universalprüfmaschine um 2 mm (das entspricht der Dicke der einzelnen Komponenten) versetzt. Um den Einfluss der Krafteinleitung bei unterschiedlicher Einspannung beurteilen zu können, wurde eine Probenserie nicht versetzt getestet (siehe Abbildung 80, **C zentriert**, Tabelle 2). In diesem Fall waren die Spannbacken zentrisch übereinander angeordnet. Da die Ergebnisse identisch sind, scheint der Einfluss sehr gering zu sein. Nur im Mittelwert fällt die maximale Kraft minimal geringer aus. Da sich die Standardabweichungen aber überlappen, lässt sich keine verlässliche Aussage dazu treffen.

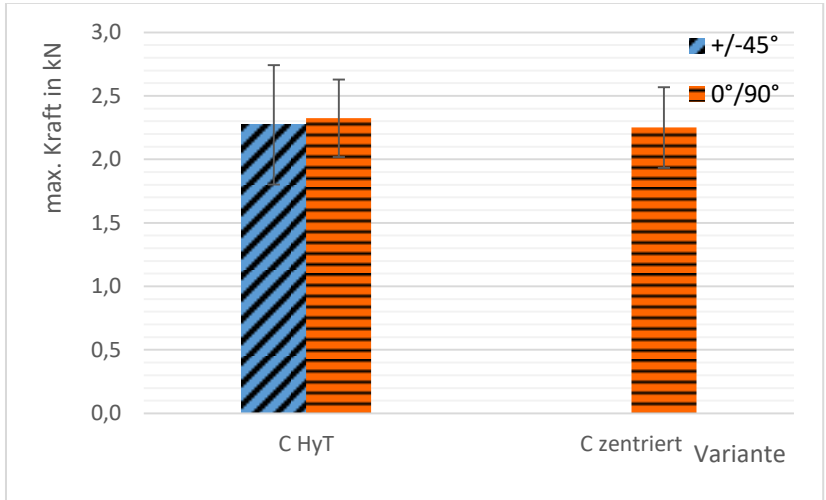


Abbildung 80: Vergleich versetzt und zentriert eingespannter Hybridproben zur Beurteilung der Krafteinleitung bei unterschiedlicher Einspannung

Somit wird angenommen, dass die Variante der Einspannung keinen messbaren Einfluss auf das Testergebnis hat und beide Varianten zulässig sind.

4.1.3.1 Versagensverhalten am Beispiel Zugversuch

Grundsätzlich fällt bei der Analyse der Proben auf, dass die Strukturreihen nacheinander versagen.

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf das Beispiel Zugversuch mit kohlefaserverstärktem Kunststoff.

Zuerst versagt immer die Adhäsion vom Harzsystem auf dem Aluminium. Dieses Versagen ist während des Versuches hörbar als eine Art „Schmatzgeräusch“. Danach versagt die erste Reihe, daraufhin die zweite dicht gefolgt von der dritten Reihe. Dieses Versagen hört sich ähnlich wie das Öffnen eines Klettverschlusses an. Dabei reißen die Fasern des kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes (das gleiche Verhalten kann auch bei glasfaserverstärktem Kunststoff beobachtet werden), die unter den Strukturen lagen, nacheinander, in der be-

zeichneten Reihenfolge, durch. Das liegt daran, dass die Krafteinleitung in die Probe auch in dieser Reihenfolge stattfindet. Die erste Reihe nimmt zuerst die Kraft auf, bevor sie an der nächsten Reihe ankommt.

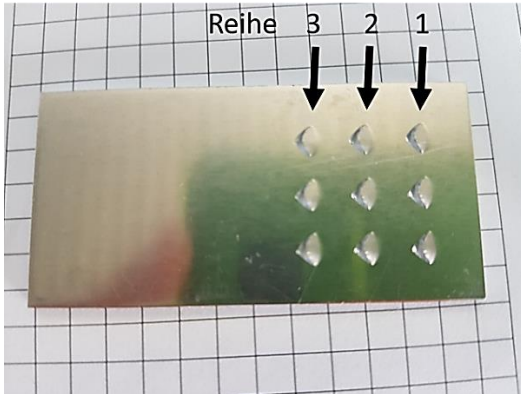


Abbildung 81: Bezeichnung der Strukturreihen

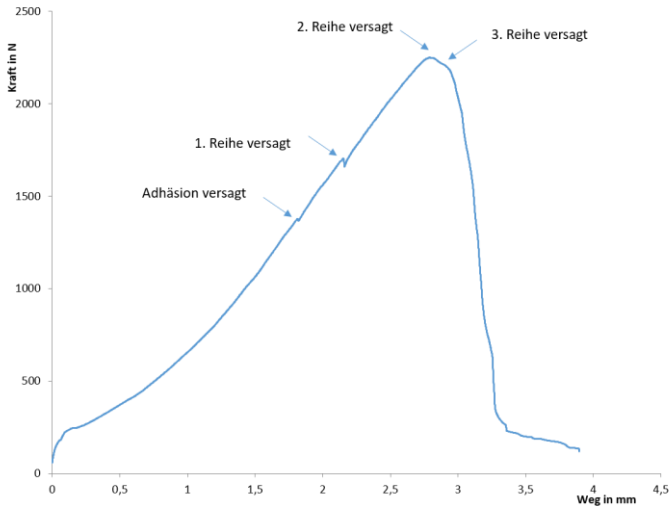


Abbildung 82: Kraft-Weg-Diagramm eines Zugversuchs, C HyT mit einer 0/90° Ausrichtung

Nach der Prüfung sind die abgerissenen Fasern deutlich hinter den Strukturen der Metallseite zu erkennen, siehe Abbildung 83. Ebenso erkenntlich sind auf der Kunststoffseite die Stellen, an denen die Fasern aus der Matrix gerissen wurden.

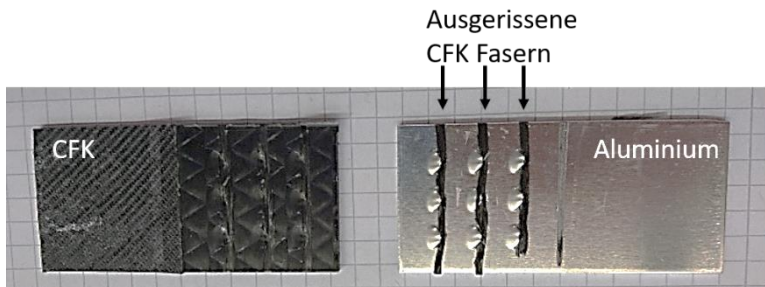


Abbildung 83: Zugprobe nach Zugversuch, CFK

Dieses Verhalten lässt sich ausnutzen, um gezieltes Versagen, ähnlich einer Art Stoßabsorber, zu begünstigen. Auf diese Art können

gezielt Kräfte eingeleitet, abgebaut, und damit am Ende abgeschwächt werden. So könnte eine Art „Opferbauteil“ versagen, ohne dass ein für den Betrieb wichtiges Bauteil versagt. Beispielsweise könnte eine Welle durchdrehen, anstatt zu hohe Kräfte auf das Getriebe zu übertragen.

4.1.3.2 Optimierung Sandstrahlen

Um das Zerschneiden der Fasern im VARI Prozess zu minimieren, wurden eine Probenserie zusätzlich gesandstrahlt (vgl. Kapitel 4.1.2.4). In Abbildung 84 sind am Beispiel der Hybridverbindung in Kombination mit Kohlenstofffasern die beiden Serien dargestellt.

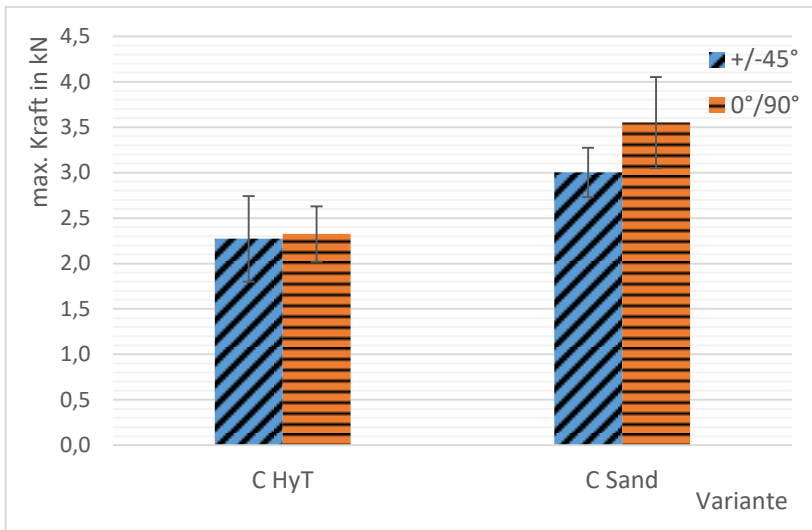


Abbildung 84: Vergleich Einfluss Sandstrahlen am Beispiel einer strukturierten Verbindung mit Kohlenstofffasern, Zugversuch

Hier ist zu erkennen, dass die maximale Kraft um ca. 2/3 erhöht wurde. Dies hat mehrere Erklärungen. Zum einen wurden schon im Herstellungsprozess weniger Fasern zerschnitten, sodass auch mehr Fasern unter Zugbeanspruchung Kraft übertragen konnten.

Zum anderen werden dadurch auch während der Zugbeanspruchung weniger Fasern getrennt.



Abbildung 85: Kohlenstofffaser Roving



Abbildung 86: Kohlenstofffaser Roving, einmal hinter den unbehandelten Strukturen abgelegt



Abbildung 87: Kohlenstofffaser Roving, einmal hinter den sandgestrahlten Strukturen abgelegt

Um einordnen zu können, welche Auswirkungen die zerschnittene Faseranzahl hat und inwiefern das Sandstrahlen eine Optimierung darstellt, wurden die Fasern optisch untersucht. In Abbildung 85 ist ein einzelner, unbeanspruchter Roving zu erkennen. Abbildung 86 zeigt den gleichen Roving, der einmal unter die Strukturen geschoben wurde. Dabei ist erkennbar, dass ca. 30 % der Fasern zerschnitten wurden. Werden die Strukturen nun sandgestrahlt, beträgt das Verhältnis der zerschnittenen zu unzerschnittenen Fasern nur noch ca. 10 % (vgl. Abbildung 87). Damit lässt sich auch erklären, warum die Probenserie C HyT nur ca. 65 % der maximalen Kraft überträgt, die die Probenserie C Sand überträgt.

Außerdem erhöht sich auch die Adhäsion des Harzsystems durch die Vergrößerung der Oberfläche.

In Abbildung 88 ist der Kraft-Weg-Verlauf einer gesandstrahlten Hybridprobe beispielhaft dargestellt. Im Vergleich mit Abbildung 82 aus Kapitel 4.1.3.1 fällt auf, dass die Adhäsionskraft um ca. 200 N höher ausfällt. Dies wird, wie erwähnt, auf die Vergrößerung der Oberfläche zurückgeführt. Auch das Versagen der Strukturereihen erfolgt deutlich später mit ca. 2/3 größerer Kraftübertragung. Dies begrün-

det sich in der Verringerung der Faserdurchtrennung sowohl im Herstellungs- als auch im Prüfprozess.

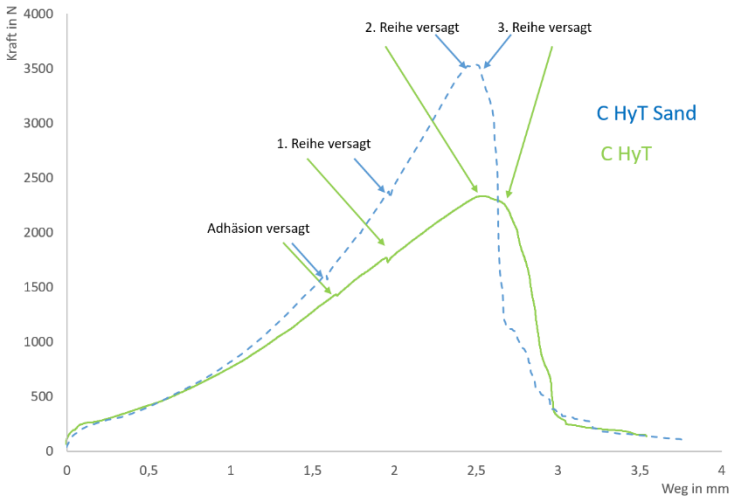


Abbildung 88: Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme einer sandgestrahlten C HyT Sand Probe (blau gestrichelt) mit einer C HyT Probe (grün)

4.1.4 Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel Zug

Um die gemessenen Werte einordnen zu können, wurde die maximal mögliche Kraft, die mit den Hybridproben erzielt werden kann, mittels klassischer Laminattheorie für die kohlenstoffaserverstärkten Proben bestimmt. Da, wie schon in Abbildung 77 und Abbildung 78 zu erkennen, nur die erste Faserlage hinter den Strukturen liegt, wird davon ausgegangen, dass diese den größten Einfluss auf die Kraftübertragung hat.

4.1.4.1 Lagenaufbau $\pm 45^\circ$

Um das Versagen bei maximaler Kraftaufnahme beurteilen zu können, wird ein Versagenskriterium nach Tsai Wu (70) benutzt. Dieses wird für die erste Faserlage angenommen. Dabei wird der Zuglastfall, wie in Abbildung 89, angenommen. Das Kriterium wird im Folgenden näher erläutert.



Abbildung 89: Zuglastfall am Beispiel C solo ± 45

In diesem Kapitel wird einmal beispielhaft der Rechenweg mit unidirektionalem Kohlenstofffasergelege mit einem ± 45 Lagenaufbau mit 4 Lagen und 2 mm Wandstärke dargestellt. Dabei gelten folgende Herstellerangaben:

$$E_{11} = 80352 \text{ MPa}$$

$$E_{22} = 2680 \text{ MPa}$$

$$G_{12} = 68 \text{ MPa}$$

$$\nu_{12} = 0,18$$

$$\nu_{21} = 0,018$$

Die einzelnen Rechenschritte befinden sich in Anhang 8.8, im folgenden ist der Rechenweg näher erläutert.

Reduzierte Steifigkeitsmatritzen Q_i berechnen:

$$(Q_i) = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix}$$

Alle Q_k in Laminat Koordinatensysteme transformieren:

$$\overline{Q}_k = T_{1,2 \rightarrow x,y}^{(\sigma)} \cdot Q_k \cdot T_{x,y \rightarrow 1,2}^{(\epsilon)}$$

ABD Matrix (Dehnungs- Kopplungs- Biegesteifigkeitsmatrix) berechnen:

$$ABD = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}$$

ABD Matrix invertieren:

$$K^{-1} = ABD^{-1}$$

Globalverzerrungen berechnen:

$$\begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa^0 \end{bmatrix} = K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} [N^0] \\ [M^0] \end{bmatrix}$$

Schichtverzerrungen der vier Schichten berechnen und transformieren:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z_k \cdot \begin{bmatrix} K_x^0 \\ K_y^0 \\ K_{xy}^0 \end{bmatrix}_k$$

Schichtspannungen berechnen:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_k = \overline{Q}_k \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_k$$

Einzelschichtverzerrungen und Einzelschichtspannungen sind bekannt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_k \text{ und } \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_k \text{ bzw. } \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}_k$$

Für diese Verzerrungen und Spannungen erfolgt eine Festigkeitsbewertung nach Tsai Wu (70) über zwei Kriterien:

- 1) Zwischenfaserbruch (Interaktionskriterium in dem die Spannungskomponenten miteinander gekoppelt sind)
- 2) Faserbruch nach dem Maximalspannungskriterium (Überschreitung der unidirektionalen Zug- bzw. -Druckfestigkeit in Faserrichtung)

Dazu werden die Tsai Wu (70) Koeffizienten wie folgt berechnet:

- 1) Zwischenfaserbruch:

$$F_{11} \cdot \sigma_1'^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1' \cdot \sigma_2' + F_{22} \cdot \sigma_2'^2 + F_{SS} \cdot \tau_{12}'^2 + F_1 \cdot \sigma_1' + F_2 \cdot \sigma_2' \leq 1$$

Mit folgenden Festigkeitswerten:

$$F_{11} = \frac{1}{X_t \cdot X_c}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t \cdot Y_c}$$

$$F_{SS} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{SS}}$$

2) Faserbruch:

$$\frac{\sigma'_1}{x_t} \leq 1 \text{ oder } \left| \frac{\sigma'_1}{x_c} \right| \leq 1$$

Dieses Kriterium verhindert unzulässige Spannungszustände, die durch den Festigkeitsausdruck F_{12} gemäß Kriterium 1 verursacht werden können.

Nun müssen die Reservefaktoren bestimmt werden:

1) Reservefaktor Zwischenfaserbruch RF(IFF)

$$RF(IFF) = \frac{2}{\sqrt{F_{11} + (F_{11}^2 + 4 \cdot F_{12})}}$$

2) Reservefaktor Faserbruch RF(FF)

$$RF(FF) = \max(F_1, F_2)$$

Daraus resultiert ein invertierter Reservefaktor IRF:

$$IRF = \frac{1}{RF(IFF)}$$

Dieser lässt sich in Prozent ausdrücken und bietet somit einen Wert zur Beurteilung des Versagenverhaltens. Wenn $IRF \geq 1$ ist, versagt das Laminat. Wenn $IRF < 1$ ist, hält es der Belastung stand.

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$\begin{aligned} N_x &= 142 \frac{N}{mm} \\ N_y &= 0 \frac{N}{mm} \\ N_{xy} &= 0 \frac{N}{mm} \end{aligned}$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kraft nur in Zugrichtung übertragen wird.

In diesem Beispiel versagt das Laminat mit

$$IRF = 1$$

Somit liegt die Zugkraft, die maximal übertragen werden kann, bei:
 $F_{Zug45Berechnung} = 4260 \text{ N}$.

Während der mechanischen Analyse konnten im Zugversuch von den Hybridverbindungen maximal im arithmetischen Mittel $F_{Zug45Versuch} = 2293,2 \text{ N}$ übertragen werden. Dieser Wert entspricht 53,83 %. Somit wurde ca. die Hälfte des theoretisch möglichen Potenzials erreicht. Eine händische Fertigung bringt immer Fehler mit sich. Gerade hinter den Hinterschneidungen der Strukturen ist es sehr schwierig einen maximal möglichen Faservolumengehalt zu realisieren. Ebenso können, wie schon erwähnt, die Fasern schon während der Fertigung beschädigt werden. Eine exakt parallele Ablage der Fasern hinter den Strukturen im ebenso exakten Winkel ist außerdem beim Lagenaufbau schwierig einzuhalten.

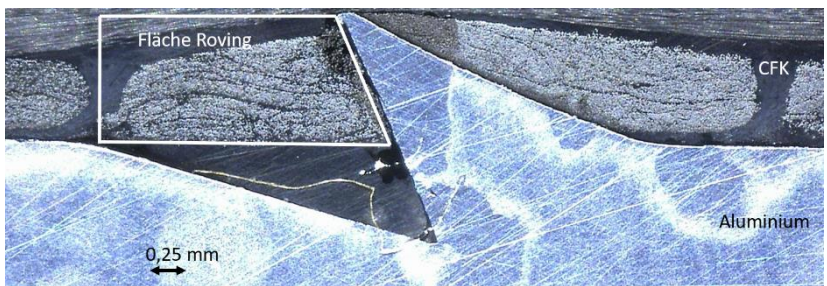


Abbildung 90: Mikroskopiebild einer Struktur mit CFK, Vergrößerung x50

In Abbildung 90 ist ein Mikroskopiebild einer Hybridprobe mit CFK mit 50facher Vergrößerung dargestellt. Es ist der Ausschnitt einer Struktur abgebildet. Die Fläche, die für eine maximale Kraftübertragung optimalerweise komplett mit CFK gefüllt sein sollte, ist hier mit

„Fläche Roving“ bezeichnet. Zu erkennen ist, dass dieser Teil nicht komplett mit einer 0° Lage Kohlenstofffasern gefüllt ist. Das kann daran liegen, dass schon während der Herstellung Fasern durchtrennt wurden und dadurch nicht mehr in diesem Bereich liegen.

In Abbildung 91 ist dieser Ausschnitt vergrößert dargestellt und die Fläche, die nicht mit Kohlenstofffasern dieser Lage gefüllt sind, in gelb gekennzeichnet. Bei der kompletten Fläche handelt es sich um ca. $1,586 \text{ mm}^2$, die gelb markierte entspricht ca. $0,4758 \text{ mm}^2$ der kompletten Fläche und somit ca. 30 %. Schon daran wird deutlich, dass das maximal mögliche Kraftpotenzial nicht ausgeschöpft wurde. Des Weiteren sind zwei Bereiche mit einem roten Kreis markiert, in denen der Faservolumengehalt auch deutlich geringer ausfällt als am Rest der Probe. Diese Flächen enthalten zusammen ca. $0,1 \text{ mm}^2$ und haben einen Faservolumengehalt von ca. 30 %. Insgesamt wurde bei dieser Probe ein Faservolumengehalt von ca. 50 % erreicht (siehe Kapitel 8.6). Somit kann in diesem Beispiel ca. 55 % des Potenzials an Kraft übertragen werden. Dadurch, dass schon bei der Probenherstellung Fasern durchgetrennt worden sein können, wird deutlich, dass die tatsächliche maximale Kraftübertragung dieser Probe mit ca. 50 % der theoretisch maximal erreichbaren Kraft plausibel erscheint.

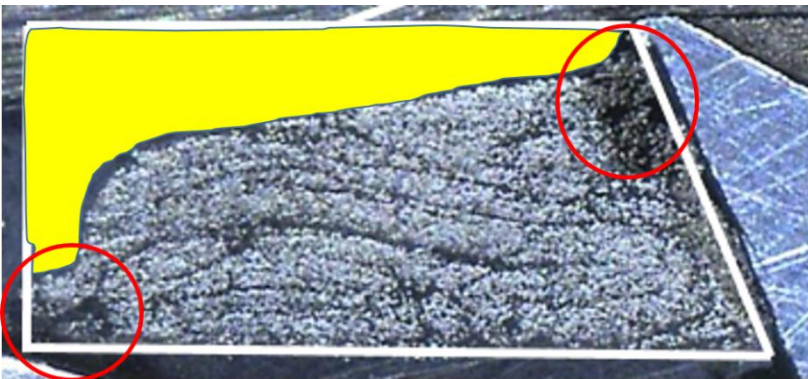


Abbildung 91: Markierter Ausschnitt aus Abbildung 90

Ein möglicher Optimierungsschritt besteht darin, wie in Kapitel 4.1.3.2 gezeigt, im Sandstrahlen der Strukturen. Hier zeigt ein Vergleich, dass ca. 83,33 % der theoretischen, maximalen Kraft übertragen worden sind. In der Nachbehandlung der Strukturen zeigt sich somit ein großes Potenzial. Sowohl eine Abrundung der Strukturen als auch evtl. eine optimierte Form, die insgesamt abgerundeter ist, wären möglich.

Es wurde nun detailliert beschrieben, wie der Rechenweg durchgeführt wurde. In den folgenden mechanischen Analysen werden die theoretisch maximalen Kräfte ebenso berechnet und mit dem Test verglichen. Auf eine erneute Darstellung des Rechenweges wird allerdings verzichtet.

4.1.4.2 Lagenaufbau 0/90°

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$\begin{aligned}N_x &= 455 \frac{N}{mm} \\N_y &= 0 \frac{N}{mm} \\N_{xy} &= 0 \frac{N}{mm}\end{aligned}$$

Somit liegen die Zugkräfte, die maximal übertragen werden können, bei: $F_{Zug90Berechnung} = 13650 \text{ N}$.

Der Versuch zeigt eine Kraft von $F_{Zug90Versuch} = 2324,2 \text{ N}$.

Somit werden ca. 17 % des maximal möglichen Potenzials ausgenutzt.

Die Kohlenstofffaser nimmt die größten Kräfte in Längsrichtung auf und nur ca. 3,5 % davon quer zur Faserausrichtung (71). Da aber die erste Faserlage bei der Herstellung der Hybridverbindung unter die Strukturen greifen muss um Formschluss zu gewährleisten, muss diese quer liegen. So können nur verhältnismäßig geringe Kräfte

übertragen werden, obwohl die Proben der Serie C solo ca. dreimal so hohe Kräfte mit einem Lagenaufbau von $0/90^\circ$ erzielen konnten wie die Proben mit einem Lagenaufbau von $\pm 45^\circ$. Das zeigt auch die Berechnung der theoretisch maximal möglichen Kraft. Die berechnete Kraft $F_{\text{Zug90Berechnung}}$ ist ebenfalls ca. dreimal so hoch wie $F_{\text{Zug45Berechnung}}$.

4.2 Dreipunktbiegung

Nachdem nun die Zugversuche erläutert wurden, werden die Ergebnisse der Biegeversuche vorgestellt. Bei der Dreipunktbiegung, siehe Abbildung 92, zeigt sich, dass hier der umgekehrte Fall im Vergleich zur generellen Kraftübertragung der Faserausrichtung vorliegt und die Fasern in 0/90° Richtung die größten Kräfte aufnehmen können, abgesehen von der genieteten Verbindung.

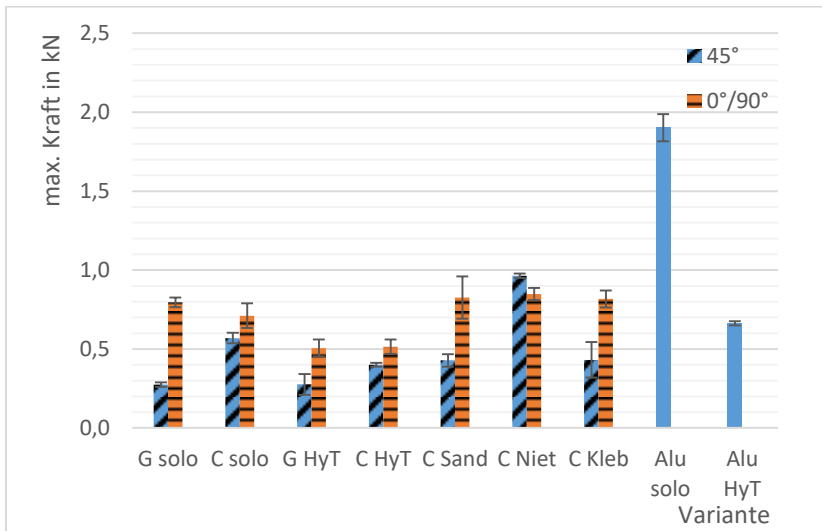


Abbildung 92: Max. Kraftübertragung bei der Dreipunktbiegung

Bei der Dreipunktbiegung können sich die Strukturen während der Biegung in die Kunststoffkomponente einpressen. Dabei werden die Fasern in 90° Richtung allerdings auch sehr stark geschädigt und versagen daher ähnlich wie diejenigen, die in 0° oder +/-45° Richtung liegen. Auffällig ist auch, dass die strukturierte, monolithische Probe bei ähnlichen Kräften versagt, wie die Hybridprobe. Das liegt darin begründet, dass die Strukturierung wie eine Art Perforierung das Aluminium schädigt und die Wandstärke durch die Strukturierung ca. halbiert wird. Auf Biegebeanspruchung versagt das Alumi-

nium also an dieser Stelle bei ähnlicher Belastung wie die Hybridprobe.

Eine beispielhafte Darstellung der getesteten monolithischen CFK Probe ist in Abbildung 93 dargestellt. Gut zu erkennen ist der Knick, der durch die Beanspruchung der Druckfinne entsteht. Hier kommt es zu Faserbrüchen.



Abbildung 93: Dreipunktbiegeversuch C solo

Ein ähnlicher Knick kann beim monolithischen, strukturierten Aluminium beobachtet werden. Abbildung 94 zeigt beispielhaft eine getestete Aluminiumprobe von der Seite.

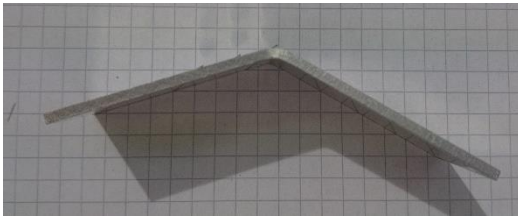


Abbildung 94: Dreipunktbiegeversuch Alu HyT

Bei der Aufsicht (Abbildung 95) fällt auf, dass die erste Strukturreihe bricht. Hier bringt die Druckfinne von der Rückseite auf diese Reihe die Biegung auf. Das Material bricht spröde.



Abbildung 95: Dreipunktbiegeversuch monolithische, strukturierte Aluminiumprobe, Draufsicht

Bei der Hybridverbindung verbiegt sich die Metallseite, wie in Abbildung 96 zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass die Kunststoffkomponente eher weniger Einfluss auf die maximal übertragenden Kräfte hat. Der Unterschied der zwei Ausrichtungen ist minimal und die Standardabweichungen nahezu gleich.



Abbildung 96: Beispielprobe C HyT Dreipunktbiegung

Beim Dreipunktbiegetest fällt auf, dass es einen Einfluss hat, ob die Proben mittig (wie in Abbildung 96 bzw. Abbildung 97) getestet werden oder um eine Reihe versetzt (Abbildung 98). Werden die Proben mittig eingelegt, drückt die Druckfinne immer direkt auf die mittlere Strukturreihe und begünstigt dadurch die Beschädigung dieser Reihe und fördert somit ein früheres Versagen.

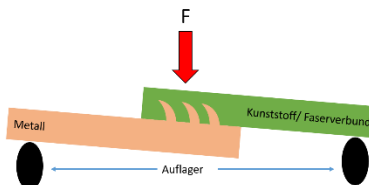


Abbildung 97: Dreipunktbiegung, Ausrichtung Druckfinne auf mittlere Reihe

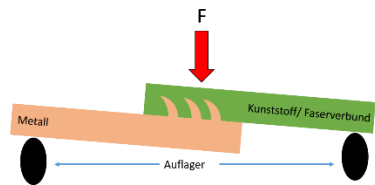


Abbildung 98: Dreipunktbiegung, Ausrichtung Druckfinne zwischen erster und zweiter Reihe

Wenn die Probe um eine halbe Strukturreihe, d.h. ca. 3 mm, versetzt (Probenname: **C versetzt**, siehe Tabelle 2) eingelegt wird, kann die maximale Kraftübertragung erhöht werden. Dabei drückt dann keine

der Aufnahmen auf die Strukturen. Außerdem wird die Kraft auf die erste Reihe erhöht, die in der Verbindung bei Zugbelastung am meisten Kräfte aufnimmt. Da bei der Dreipunktbiegung sowohl Zug- als auch Druckkräfte entstehen, wird die Krafteinleitung in Zugrichtung auf die erste Reihe vergrößert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 99 dargestellt.

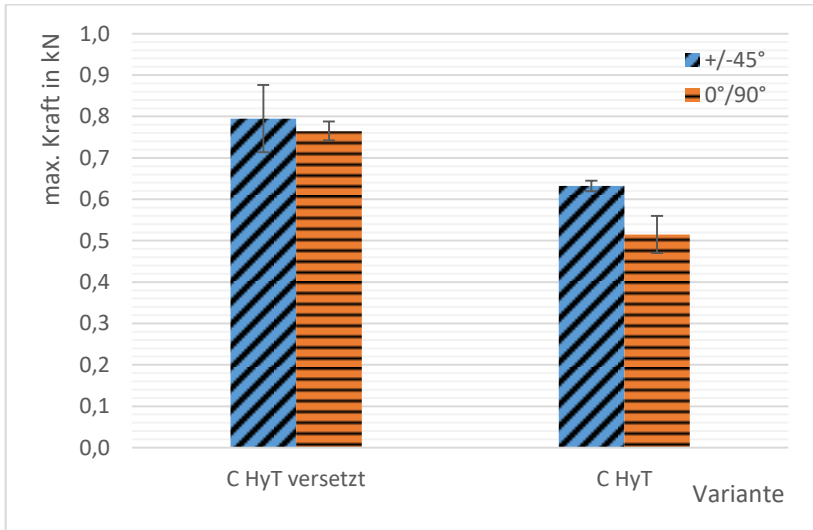


Abbildung 99: Vergleich der Einspannungen im Dreipunktbiegeversuch (mittig= C45/C90 HyT und eine halbe Reihe versetzt= C45/C90 HyT versetzt)

Hier wird also deutlich, dass mehr Kraft übertragen werden kann, wenn die Druckfinne versetzt wird. Das liegt darin begründet, dass die Druckfinne nicht auf die Strukturen drückt und sie somit nicht beschädigt.

4.2.1 Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel Biegung

Diese Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die Druckfinne mittig ein Moment auf das Laminat aufbringt, das auf zwei Loslagern aufliegt, siehe Abbildung 100 und Abbildung 101.

4.2.1.1 Lagenaufbau +/-45°

In der folgenden Abbildung sind die Kräfte dargestellt, die als Moment in die Berechnung miteingehen. Der Hebelarm wird in diesem Fall mit 30 mm angenommen.

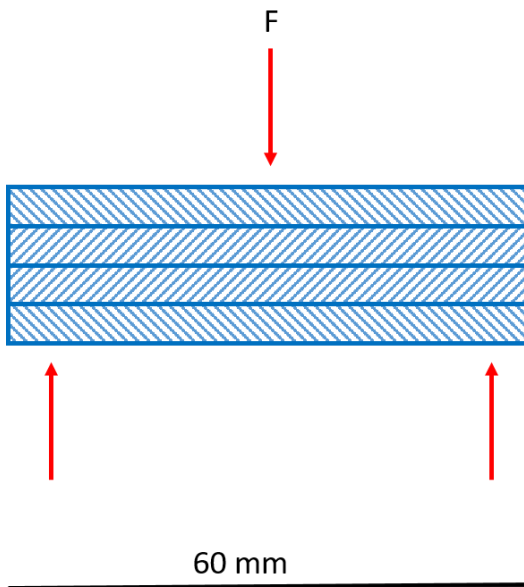


Abbildung 100: Lastfall am Beispiel C solo +/-45

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$M_x = 102 \frac{Nmm}{mm}$$

$$M_y = 0 \frac{N}{mm}$$
$$M_{xy} = 0 \frac{N}{mm}$$

Somit liegt die Kraft, die maximal übertragen werden kann, bei:
 $F_{3PB45Berechnung} = 816 \text{ N}$.

Der Versuch zeigt eine Kraft von $F_{3PB45Versuch} = 632 \text{ N}$.

Somit werden ca. 77,45 % des maximal möglichen Potenzials ausgenutzt.

Ein ähnliches Verhältnis wird auch bei einem Vergleich der Hybridprobenserie C HyT mit den C solo Proben festgestellt. Die Kohlenstofffasern haben einen sehr hohen E-Modul, vgl. Tabelle 3, Seite 69, und versagen somit bei Biegebelastung im 0/90° Aufbau eher als die G solo Proben. Da bei den Hybridproben die Aluminiumstrukturen mit aufgebogen werden und diese sich in Richtung der Belastung biegen, kann eine vergleichsweise hohe Kraftausbeute von ca. 77 % erzielt werden

4.2.1.2 Lagenaufbau 0/90°

In der folgenden Abbildung sind die Kräfte dargestellt, die als Moment in die Berechnung miteingehen. Der Hebelarm wird in diesem Fall mit 30 mm angenommen.

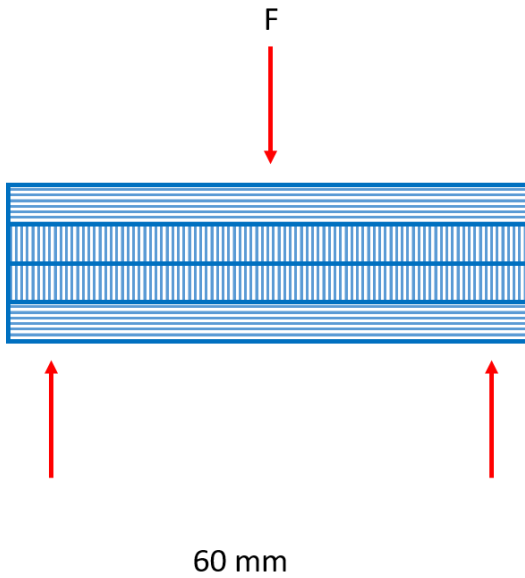


Abbildung 101: Lastfall am Beispiel C solo 0/90

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$M_x = 710 \frac{Nmm}{mm}$$

$$M_y = 0 \frac{N}{mm}$$

$$M_{xy} = 0 \frac{N}{mm}$$

Somit liegt die Zugkraft, die maximal übertragen werden kann, bei:
 $F_{3PB90Berechnung} = 1420 \text{ N}$.

Der Versuch zeigt eine Kraft von $F_{3PB90Versuch} = 515 \text{ N}$.

Somit werden ca. 36,27 % des maximal möglichen Potenzials ausgenutzt.

Auffällig ist, dass die gemessenen Kräfte der Dreipunktbiegung der Serie C HyT mit einem Lagenaufbau von $0/90^\circ$ kleiner sind als die des Lagenaufbaus mit $\pm 45^\circ$. Dies liegt ebenfalls darin begründet, dass die Fasern der ersten Lage des Laminats quer zur Belastungsrichtung liegen und somit weniger Kraft aufnehmen können als die schräg angeordneten Fasern in 45° Ausrichtung. Die Hybridproben übertreffen im Schnitt auch die gemessenen Kräfte der C solo Proben. Das liegt darin daran, dass sich die Aluminiumstrukturen in Belastungsrichtung aufbiegen bevor sie versagen.

4.3 Energiefreisetzungsrate

Als dritte mechanische Analyse wird die Energiefreisetzungsrate mittels G_{1C} Messungen bestimmt. Ähnlich wie die Kraftübertragung der maximalen Kräfte bei den Zugversuchen, können die größten Energiefreisetzungsraten (siehe Abbildung 102) tendenziell bei den Serien mit einer Faserlagenausrichtung von $0/90^\circ$ übertragen werden im Vergleich zu der $\pm 45^\circ$ Ausrichtung. Dies gilt grundsätzlich für alle hier verglichenen Serien.

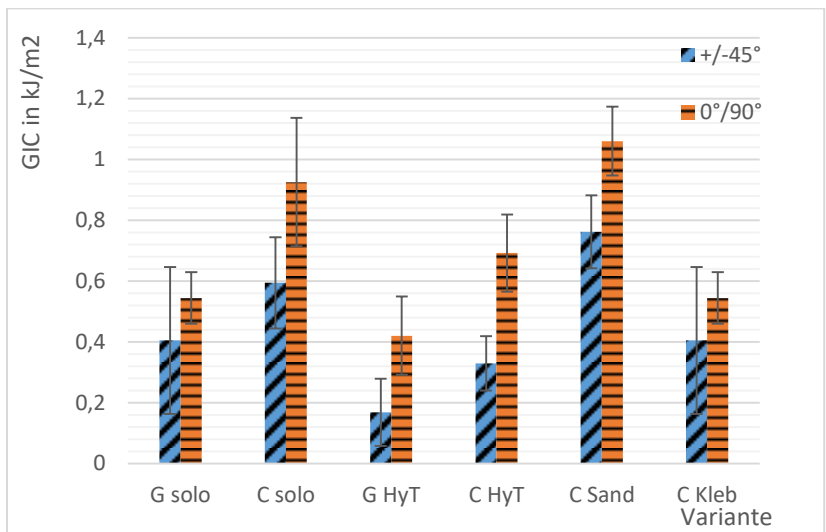


Abbildung 102: Max. Energiefreisetzungsrate, G_{1C}

In Abbildung 103 ist zur Veranschaulichung beispielhaft eine geprüfte G solo Probe gezeigt. Hier sind die Scharniere auf der linken Seite und die Bruchfläche auf der rechten Seite zu erkennen.



Abbildung 103: G1C Versuch GFK (G solo)

In Bezug auf die Interpretation lässt sich feststellen, dass die Standardabweichungen teilweise überlappen. Insofern lässt sich das Ergebnis nur als Trend ablesen.

4.3.1 Berechnung der theoretisch maximalen Kraftübertragung am Beispiel G_{1C}

Diese Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass ein Moment auf die Hälfte des Laminataufbaus nach oben und ein Moment auf den anderen Teil nach unten aufgebracht werden, siehe Abbildung 104 und Abbildung 105. Außerdem wird die Annahme getroffen, dass das Laminat an der linken Seite eingespannt ist, ähnlich wie ein Kragarm.

4.3.1.1 Lagenaufbau $\pm 45^\circ$

In der folgenden Abbildung sind die Kräfte dargestellt, die als Moment in die Berechnung miteingehen. Der Hebelarm wird in diesem Fall mit 60 mm angenommen.

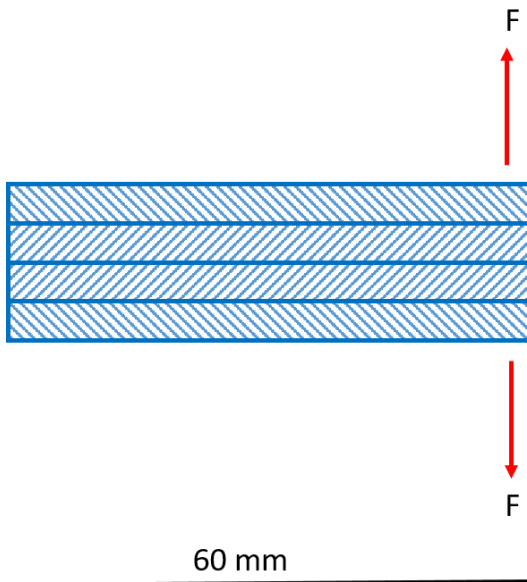


Abbildung 104: Lastfall am Beispiel C solo $\pm 45^\circ$

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$M_x = 204 \frac{Nmm}{mm}$$

$$M_y = 0 \frac{N}{mm}$$

$$M_{xy} = 0 \frac{N}{mm}$$

Somit liegen die Kräfte, die maximal übertragen werden können, bei:
 $F_{G1C45Berechnung} = 408 \text{ N}$.

Der Versuch zeigt eine Kraft von $F_{G1C45Versuch} = 170 \text{ N}$.

Somit werden ca. 41,7 % des maximal möglichen Potenzials ausgenutzt.

Auffällig ist zunächst einmal die hohe Standardabweichung der gemessenen C solo Probe. Aufgrund dieser Streuung lässt sich schwierig ein Vergleich mit den anderen Proben erstellen, es kann nur von einer Tendenz ausgegangen werden. Die gemessenen Werte der Kohlenstofffaser Hybridserie zeigen somit ähnliche Werte wie die der solo Proben. Da es sich bei den solo Proben nicht um die normgerechte Geometrie dieser mechanischen Analyse handelt und diese gerade in diesem Belastungsfall aber über den Rissfortschritt der Probe entscheidet, fallen die Messungen sehr niedrig aus im Vergleich zu der berechneten Kraft. Somit werden hier schlechtere Werte gemessen und der Vergleich $F_{G1C45Berechnung}$ zu $F_{G1C45Versuch}$ liegt bei nur ca. 40 %, obwohl die Versuche eine Ausbeute von deutlich höheren Werten erwarten lassen.

4.3.1.2 Lagenaufbau 0/90°

In der folgenden Abbildung sind die Kräfte dargestellt, die als Moment in die Berechnung miteingehen. Der Hebelarm wird in diesem Fall mit 60 mm angenommen.

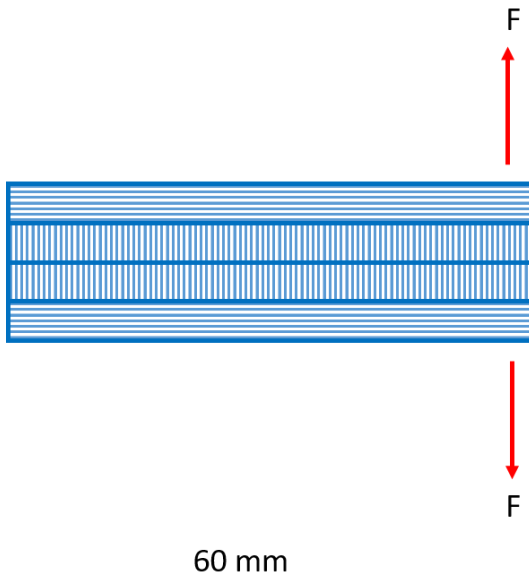


Abbildung 105: Lastfall am Beispiel C solo 0/90

Nach dem Tsai Wu Kriterium versagt die Probe bei einer Belastung von:

$$M_x = 355 \frac{Nmm}{mm}$$

$$M_y = 0 \frac{N}{mm}$$

$$M_{xy} = 0 \frac{N}{mm}$$

Somit liegt die Zugkraft, die maximal übertragen werden kann, bei:
 $F_{G1C90Berechnung} = 710 \text{ N}$.

Der Versuch zeigt eine Kraft von $F_{G1C90Versuch} = 397 \text{ N}$.

Somit werden ca. 55,9 % des maximal möglichen Potenzials ausgenutzt.

Sehr auffällig ist hier, dass die gemessenen Werte der Kohlenstoff-faser Hybridserie mit einem Lagenaufbau von $0/90^\circ$ niedrigere Werte als die der Solo-Proben zeigen, allerdings überlappen die Standardabweichungen, sodass diese Werte nur als Tendenz zu interpretieren sind. Nebenbemerkung: obwohl der Durchschnittswert dieser Proben höher ist als der des $\pm 45^\circ$ Aufbaus, lässt sich auf Grund der Standardabweichungen trotzdem keine zuverlässige Aussage über die höhere Energieaufnahme treffen.

Auch hier würde erwartet werden, dass die Versuche eine große Ausbeute des theoretisch möglichen Potenzials ausnutzen. Jedoch liegt die Ausbeute von $F_{G1C90\text{Versuch}}$ bei ca. 56 % von $F_{G1C90\text{Berechnung}}$. Da vermutlich, wie bereits oben erwähnt, die Versuchsgeometrie der Solo-Proben ungeeignet für diese Prüfung ist. Die hohen Standardabweichungen unterstützen diese These. Trotzdem wurde die Geometrie hier verwendet, um die sie über den gesamten Versuchsumfang in sich konsistent zu halten.

4.4 Mikroskopische Auswertung

Von folgenden Serien wurden Schliffbilder erstellt, um die Verbindungsqualität optisch analysieren zu können:

C HyT +/-45

C HyT 0/90

G HyT +/- 45

G HyT 0/90

Dabei lag besonderes Augenmerk auf Lufteinschlüssen, der Lage der Fasern hinter den Strukturen und Fremdkörpern. Nach dem Einbetten der Proben in eine Epoxidharzmatrix konnten sie anschließend bis zum höchsten Punkt der Strukturen geschliffen werden. Nach abschließender Polierung der Oberfläche entstanden mittels Auflichtmikroskop vergrößerte Bilder mit einer Vergrößerung von 100x.

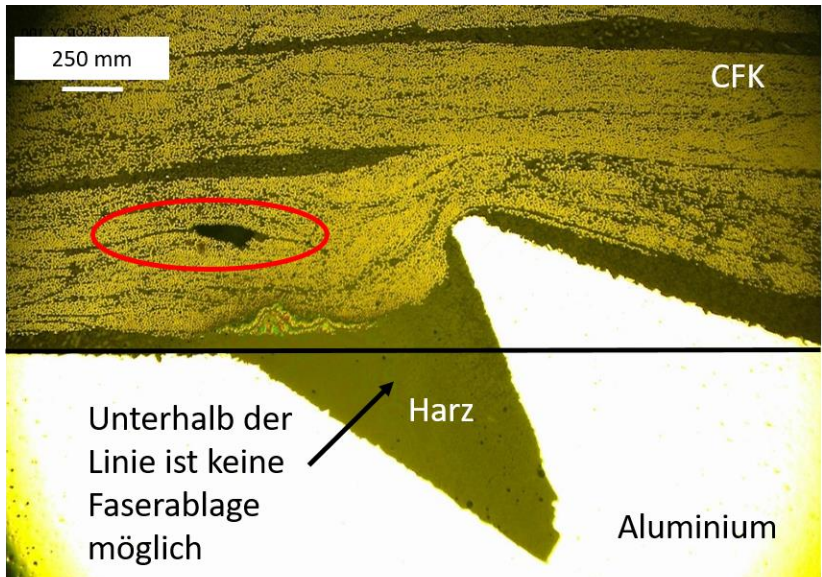


Abbildung 106: Mikroskopiebild mit C Fasern in +/-45° Richtung (C HyT +/-45) Vergrößerung 100x

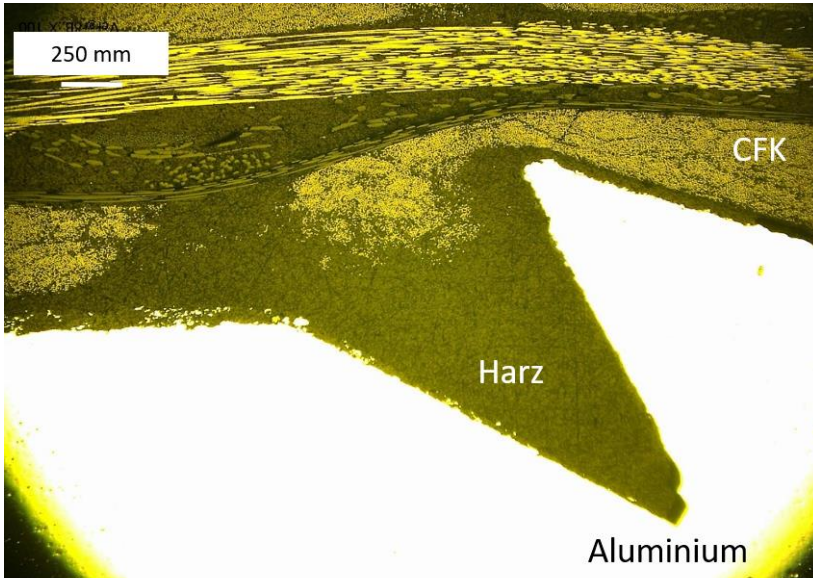


Abbildung 107: Mikroskopiebild mit C Fasern in 0/90° Richtung (C HyT 0/90). Vergrößerung 100x

Die Abbildung 106 und Abbildung 107 zeigen Schliiffbilder der Serien mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. In Abbildung 106 zeigt sich durch eine optische Analyse, dass nur ca. 60 % der Fläche hinter der Struktur mit Fasern gefüllt ist. Außerdem gibt es direkt hinter der Struktur einen Lufteinschluss (dunkler, länglicher Fleck, markiert mit rotem Oval). Ohne diese Fehlstelle und den nicht ausgenutzten Platz zur Faserablage könnte die Kraftübertragung der Probe noch gesteigert werden. Bei der Prüfung stellt der Lufteinschluss keine Probleme hinsichtlich Delamination dar, da die Verbindungsstelle versagt, bevor es zu einer Delamination kommt.

In Abbildung 107 ist die 0° Lage (die in z-Richtung aus der Bildebene herausgeht) hinter den Strukturen zu erkennen. Ebenso sind Fasern hinter der Struktur auszumachen. Allerdings ist in diesem Fall noch weniger der Raum hinter der Struktur mit Fasern gefüllt als in der vorherigen Abbildung. Eine optische Analyse zeigt, dass es nur ca. 40 % sind.

Die beiden nächsten Abbildungen (Abbildung 109 und Abbildung 108) zeigen Proben mit glasfaserverstärktem Kunststoff. In beiden Bildern sind Fasern hinter den Strukturen zu erkennen. Allerdings ist das Potenzial bei weitem nicht ausgeschöpft. Beide Bilder lassen erkennen, dass der Raum hinter den Strukturen nicht vollständig mit Fasern gefüllt ist. Lufteinschlüsse sind keine zu erkennen. Der Faserservolumengehalt lag in diesem Fall bei ca. 47 %, vgl. Tabelle 5 in Anhang 8.6.

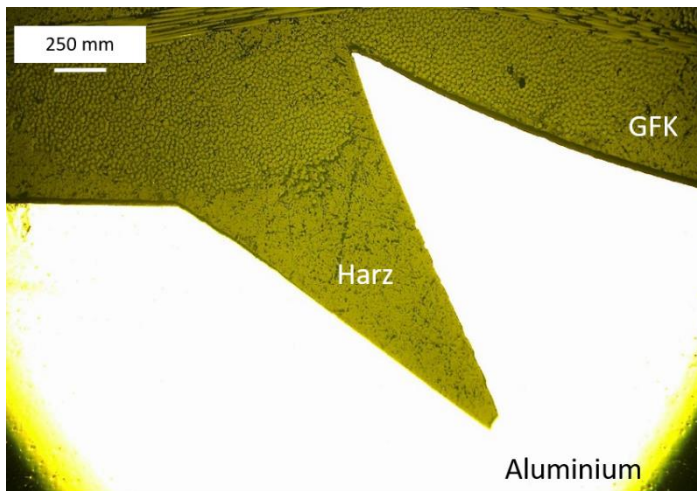


Abbildung 108: Mikroskopiebild mit G Fasern in +/-45° Richtung . Vergrößerung 100x

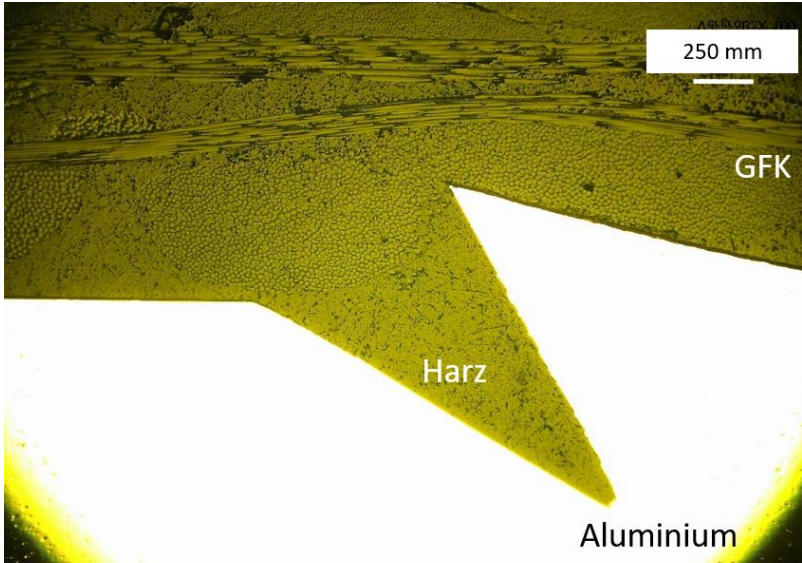


Abbildung 109: Mikroskopiebild mit G Fasern in 0/90° Richtung (G HyT 0/90). Vergrößerung 100x

Eine Betrachtung, wieviel von dem theoretisch möglichen Potenzial tatsächlich erreicht wurde, befindet sich in Kapitel 4.1.4. Dort wird zunächst erörtert, wieviel Kraft theoretisch maximal übertragen werden kann, wenn der Raum hinter der Struktur mit einer maximalen Faseranzahl ausgefüllt ist. Dieses Kraftpotenzial wird mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen.

4.4.1 Reproduzierbarkeit der Metallstrukturen

Außerdem wurden ausgewählte Metallbleche während des Versuchsverlaufs vermessen, um den Werkzeugverschleiß bzw. die Reproduzierbarkeit beurteilen zu können. Dabei wurden keine Unterschiede (im Toleranzbereich von $\pm 0,1$ mm) festgestellt.

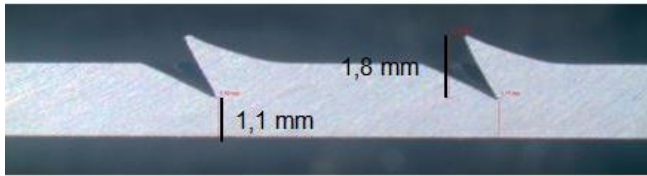


Abbildung 110: Vermessung einer strukturierten Metallprobe nach der Herstellung von 10 Proben

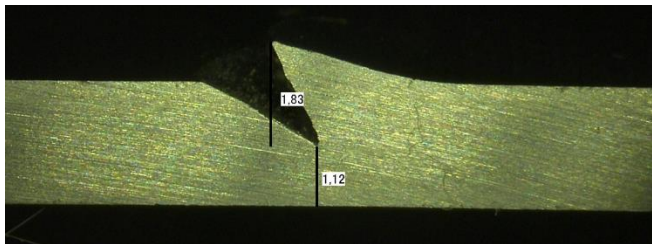


Abbildung 111: Vermessung einer strukturierten Metallprobe nach der Herstellung von 200 Proben

Zwischen den in Abbildung 110 und Abbildung 111 vermessenen Proben liegen ca. 1800 Strukturierungsvorgänge. Innerhalb dieser ist eine Veränderung sowohl der Strukturen als auch des Strukturierungswerkzeuges kaum erkennbar. Nichtsdestotrotz wurde nach 200 Proben ein neues Werkzeug benutzt und die nächsten 200 Proben hergestellt. In regelmäßigen Abständen wurde die Strukturausprägung überprüft. Abbildung 111 zeigt beispielhaft eine Vermessung.

4.5 Faservolumengehalt

Um die Qualität der manuellen Anfertigung der Proben und eventuell auftretende Besonderheiten bei der Prüfung beurteilen zu können, wurde der Faservolumengehalt bei ausgewählten Proben bestimmt. Dieser lag zwischen 45-47 %. Die Differenz von 3 % liegt im üblichen Rahmen bei manuell hergestellten Proben. Ebenso handelt es sich um übliche Faservolumengehalte von Proben, die im VARI Verfahren hergestellt wurden. Hierbei sind bis zu 50 % Faservolumengehalt möglich.

Die einzelnen Ergebnisse befinden sich im Anhang 8.6 in Tabelle 5. Somit wird die Kunststoffkomponente als reproduzierbar angenommen.

4.6 Vergleich der maximalen Spannungen

Bisher wurden nur die maximal auftretenden Kräfte miteinander verglichen. In Bezug auf die projizierte Fläche, die tatsächlich die Kraft überträgt, sind die maximalen Spannungen der Hybridverbindung und der Nietverbindung in Abbildung 112 dargestellt. Denn die Fläche, an der eigentlich die Kraft übertragen wird, umfasst nicht den kompletten Querschnitt der Probe, sondern nur die Fläche an den Strukturen, bzw. der Niete.

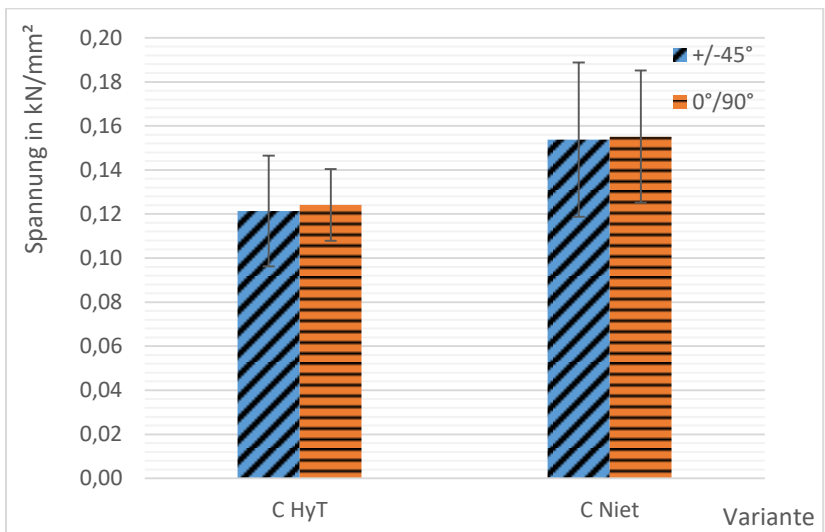


Abbildung 112: Vergleich der max. Spannungen in Bezug auf die projizierte Fläche

Die projizierte Fläche einer Struktur wurde mit einem Laserscanningmikroskop der Firma Keyence (VK-X1000) dreidimensional vermessen. Ein dreidimensionales Bild einer Struktur ist in Abbildung 113 zu finden, die vermessenen Daten befinden sich in Anhang 8.7.

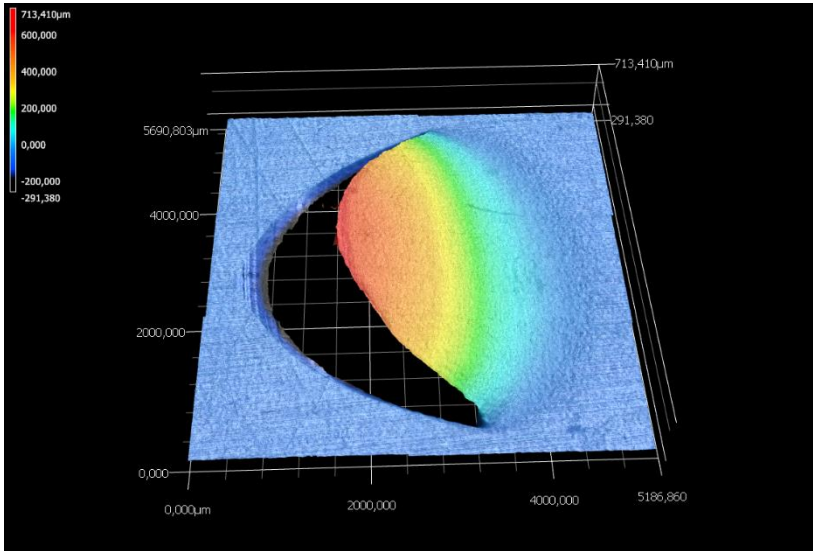


Abbildung 113: 3D Vermessung einer Struktur mittels Laserscanningmikroskop (Keyence, VK-X1000)

Somit ergibt sich für eine Struktur eine Fläche von ca. 2,08 mm². Alle neun Strukturen besitzen somit eine Fläche von ca. 18,72 mm². Für die Nietverbindung wird die halbe Zylindermantelfläche mit den Maßen aus Abbildung 114 zu 31,42 mm² berechnet.

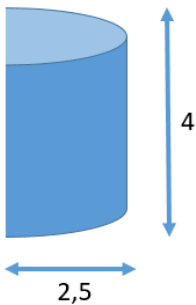


Abbildung 114: Projizierte Fläche des Niets in mm

Dabei ist zu erkennen, dass die Spannung bei der neuen Hybridverbindung fast an die konventionelle Nietverbindung herankommt. Da die Standardabweichungen überlappen, lässt sich nur eine Tendenz, aber keine absolute Aussage, formulieren. Insofern erreicht die innovative Hybridverbindung beinahe die konventionelle, industriell eingesetzte Nietverbindung.

4.7 Zusammenfassung

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 bis 4.3 noch einmal übersichtlich mittels Netzdiagrammen dargestellt. In Abbildung 115 sind die Ergebnisse der Zugprüfung, in Abbildung 116 die Ergebnisse der Dreipunktbiegung und in Abbildung 117 die Ergebnisse der Energiefreisetzungsraten gezeigt. Die Mittelwerte der faserverstärkten Serien sind sowohl für einen Lagenaufbau von $\pm 45^\circ$ als auch von $0/90^\circ$ abgebildet. Der Mittelwert der Aluminiumproben wird als Einzelwert dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Proben mit einem Lagenaufbau von $0/90^\circ$ in den meisten Fällen mehr Kraft übertragen können als diejenigen mit einem Lagenaufbau von $\pm 45^\circ$.

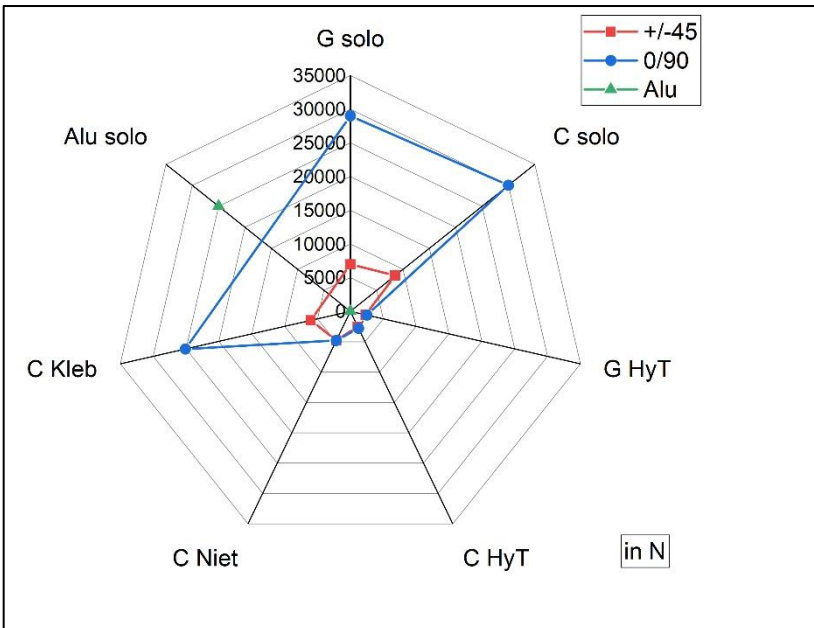


Abbildung 115: Ergebnisse der maximalen Zugkraft in N

Nichtsdestotrotz erreichen die Hybridverbindungen nicht die gleichen absoluten Werte der maximalen Kraftübertragung wie die monolithischen Materialien.

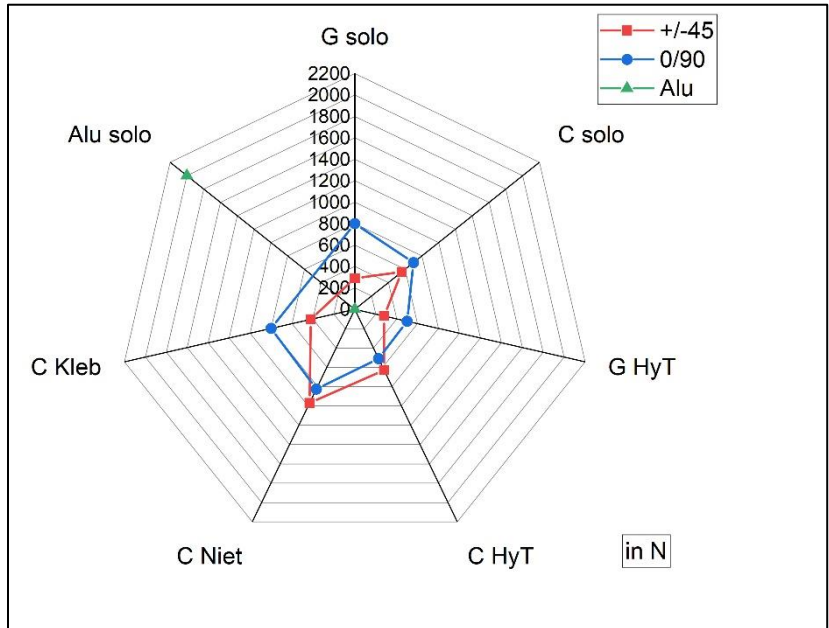


Abbildung 116: Ergebnisse der maximalen Kraftübertragung bei der Dreipunktbiegung in N

Insgesamt werden noch zu viele Fasern durch die scharfkantigen Strukturen bei Faserablage beschädigt. Außerdem werden die lokalen Faservolumenbereiche hinter den Strukturen nicht optimal ausgenutzt. Hier müssten mehr Fasern abgelegt werden können. Mit der hier verwendeten händischen Faserablage konnten die Räume hinter den Fasern nicht komplett gefüllt werden.

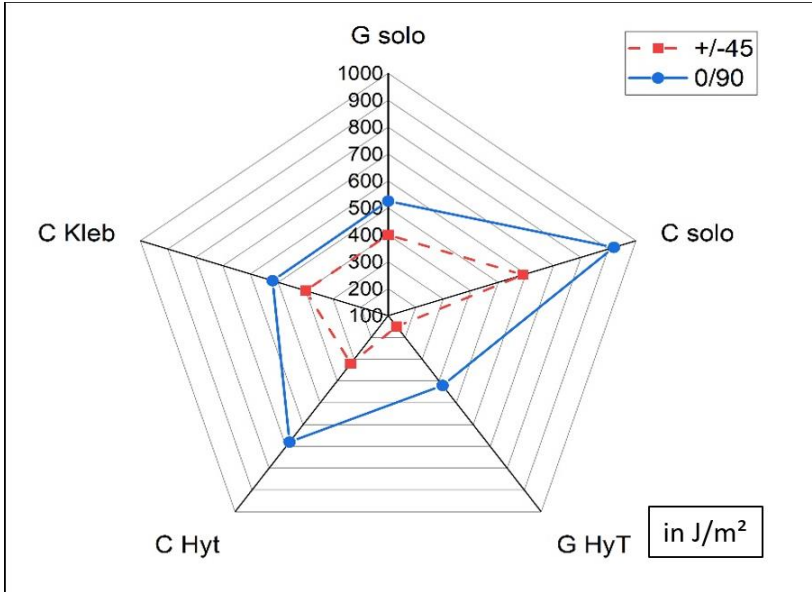


Abbildung 117: Ergebnisse der Energiefreisetzungsraten im G_{1C} Versuch in J/m^2

Lediglich die Ergebnisse der Energiefreisetzungsraten erreichen, zumindest im Lagenaufbau mit $0/90^\circ$ Ausrichtung, bessere Ausbeuten als die Ergebnisse der anderen beiden Analysen. Das liegt daran, dass die Strukturen wie eine zusätzliche Verklammerung wirken. Nichtsdestotrotz wurden die Fasern bei Ablage beschädigt. Daher konnten die Werte der monolithischen Materialien nicht erreicht werden.

4.8 Interpretation der Ergebnisse am Beispiel CFK

Im Folgenden werden die gemessenen Ergebnisse der kohlenstofffaserverstärkten Proben hinsichtlich der berechneten, maximal möglich übertragbaren Kraft, interpretiert. Dazu wurde ein Netzdiagramm ausgewählt, um diese Ergebnisse komfortabel darzustellen. Hier wurden die drei mechanischen Analysen des Zugversuchs (Zug), der Dreipunktbiegung (3PB) und der Energiefreisetzungsrate (G_{1C}) jeweils auf den Achsen aufgetragen. Für eine übersichtlichere Ansicht

sind die maximalen Kräfte in N abgebildet. Auch bei der Energiefreisetzungsrates wurde die maximale Kraft aufgetragen und nicht die Energie. Die Diagramme wurden sowohl für den Lagenaufbau mit $\pm 45^\circ$ als auch $0/90^\circ$ erstellt. Die gestrichelte rote Linie stellt die berechneten Werte dar, die durchgehende blaue Linie zeigt die gemessenen Werte der Versuche.

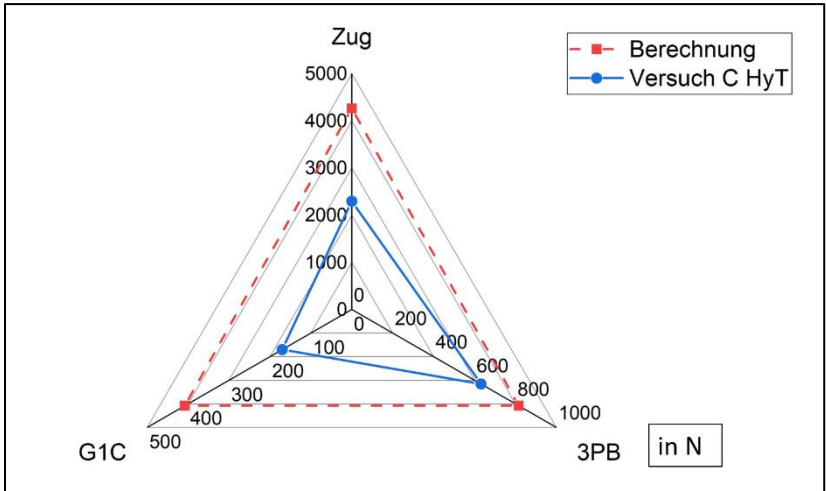


Abbildung 118: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau von C HyT in N

Abbildung 118 zeigt die berechneten maximalen Kräfte im Lagenaufbau von $\pm 45^\circ$ im Vergleich zu den gemessenen Werten. Hier wird deutlich, dass die theoretisch maximalen Werte nicht erreicht werden. Bei der Dreipunktbiegung wird mit 77,45 % das Potenzial am besten ausgenutzt. Sowohl im Zug- als auch im G_{1C} Versuch konnte nur ca. die Hälfte der berechneten Kraft übertragen werden. Absolut gesehen, können, wie erwartet, in Zugrichtung die größten Kräfte übertragen werden, weil die Faser auch entlang der Längsachse deutlich mehr Kräfte übertragen kann als in Querrichtung. Denn in Querrichtung werden von der Faser kaum Kräfte übertragen, sondern hauptsächlich von der Matrix. Bei der Dreipunktbiegung wird auf die Proben eine Biegebeanspruchung mittels eines Momentes

ausgeübt. Im Vergleich zum Aluminium sind die Kohlenstofffasern deutlich biegesteifer. Hier versagt der Aluminiumteil, siehe Abbildung 119. Insofern kann selbstverständlich nicht die maximal mögliche Kraft erreicht werden, da der kohlenstofffaserverstärkte Kunststoff nur an der Stelle, an der die metallischen Strukturen aus dem Kunststoffteil ausreißen (siehe grüner Kreis), beschädigt wird.



Abbildung 119: Beispielprobe Dreipunktbiegung C HyT

Ein ähnliches Verhalten kann auf die G_{1C} Prüfung übertragen werden. Auch hier wird ein Moment, siehe Kapitel 4.3.1.1, auf die Proben aufgebracht. Durch die Paarung der zwei unterschiedlichen Werkstoffe charakterisieren diese Tests zwar die Verbindung aber nicht die beiden Einzelkomponenten. Die durchgeführten Berechnungen mittels CLT beschreiben das Werkstoffverhalten der Kunststoffkomponente, da angenommen wird, dass diese versagt. Hier sollten in weiteren Untersuchungen komplexe Berechnungen oder Simulationen durchgeführt werden, die das Werkstoffverhalten beider Komponenten berücksichtigen. So lässt sich eine verlässlichere Aussage treffen, wann das Material versagt und welches Material zuerst versagt.

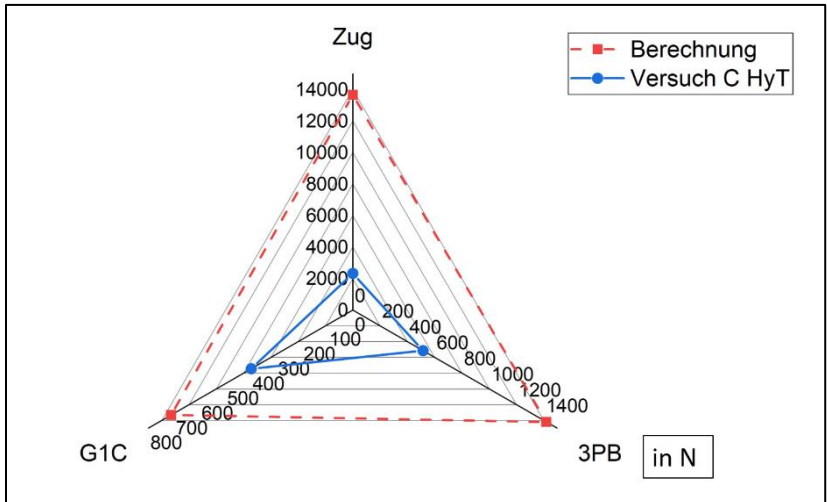


Abbildung 120: Gegenüberstellung der berechneten Kraft und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem $0/90^\circ$ Lagenaufbau von C HyT in N

In Abbildung 120 ist zu erkennen, dass noch weniger Potenzial ausgenutzt werden konnte als bei einem Lagenaufbau mit $\pm 45^\circ$. Hier werden in Zugbeanspruchung ca. 17 % und in Biegebeanspruchung ca. 36 % der theoretischen maximalen Kraft übertragen. Bei der G_{1C} Messung konnten ca. 56 % des Potenzials ausgenutzt werden. Insbesondere im Zugversuch ist die Ausbeute an Kraftübertragung sehr gering und das maximal mögliche Potenzial ist bei weitem nicht ausgeschöpft.

Die absolut übertragenen Kräfte im Beispiel Zugversuch und Dreipunktbiegung sind ähnlich. Das ausgenutzte Potenzial in Bezug auf die errechnete Kraft ist jedoch deswegen geringer, weil der Lagenaufbau mit $0/90^\circ$ höhere Kräfte übertragen kann als derjenige mit $\pm 45^\circ$. Das resultiert daraus, dass im $0/90^\circ$ Aufbau bei zwei Lagen die Fasern exakt entlang der Zugrichtung ausgerichtet sind und diese Fasern am meisten Kräfte aufnehmen können.

Im G_{1C} Versuch konnten absolut gesehen höhere Kräfte übertragen werden. Das liegt daran, dass die erste Faserlage direkt quer unter die Metallstrukturen greifen kann, siehe Abbildung 121. Im Fall der

$\pm 45^\circ$ Ausrichtung (Abbildung 122) liegen die Fasern schräg unter den Strukturen und können so weniger Kräfte aufnehmen, die durch das angreifende Moment verursacht werden.



Abbildung 121: Faserausrichtung eines Beispielroving im $0/90^\circ$ Aufbau



Abbildung 122: Faserausrichtung eines Beispielroving im $\pm 45^\circ$ Aufbau

4.8.1 Optimierung Sandstrahlen

Wie bereits in Kapitel 4.1.3.2 gezeigt, konnte durch das Sandstrahlen die maximale Kraftübertragung größtenteils optimiert werden. In Abbildung 124 und Abbildung 123 ist im jeweiligen Netzdiagramm aus dem vorherigen Kapitel die Optimierung durch das Sandstrahlen ebenfalls dargestellt.

In Abbildung 123 fällt auf, dass die Optimierung sich im Falle der $\pm 45^\circ$ Lagen auf die Dreipunktbiegeversuche nicht deutlich positiv ausgewirkt hat. Im Prinzip ist das Ergebnis der sandgestrahlten Proben ähnlich zu denjenigen ohne Sandstrahlen.

Im Zugversuch konnte die Kraftübertragung um ca. 16 Prozentpunkte und im G_{1C} Versuch sogar um ca. 42 Prozentpunkte gesteigert werden. Allerdings treten auch hier sehr große Standardabweichungen im G_{1C} Versuch auf.

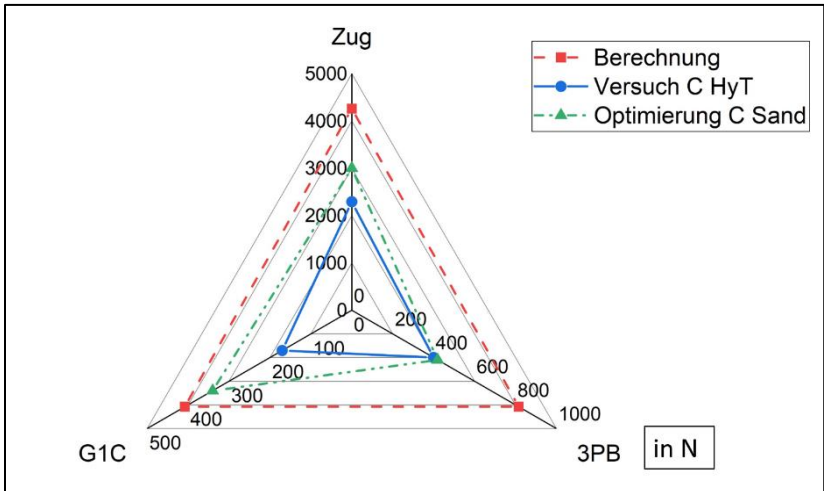


Abbildung 123: Gegenüberstellung der berechneten maximalen Kraft, der Optimierung durch Sandstrahlen und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau von C HyT in N

Auffällig ist, dass das ausgenutzte Potenzial mit einem Lagenaufbau von $\pm 45^\circ$ größer ist. Das liegt daran, dass die Fasern der ersten Faserlage im $0/90^\circ$ Aufbau, sowohl orthogonal zu den Strukturen als auch der Zugrichtung, ausgerichtet sind. In diese Richtung kann eine Kohlenstofffaser am wenigsten belastet werden. In Längsrichtung kann die Faser die größten Kräfte aufnehmen. Da beim $\pm 45^\circ$ Aufbau die Fasern zu gleichen Teilen in Zugrichtung quer zur Zugrichtung ausgerichtet sind, können sie hier mehr Potenzial ausnutzen. Bei der Dreipunktbiegung fällt die Optimierung nur maginal aus. Das liegt darin begründet, dass bei dieser Belastungsart die Kraftübertragung über die Strukturen kaum durch die durch die Sandstrahlung verursachte Mikrostrukturierung vergrößert werden kann. Sobald die Probe gebogen wird, hat die Mikrostrukturierung kaum noch Einfluss. Insgesamt lässt sich feststellen, dass das mögliche Potenzial noch nicht ausgeschöpft wurde und noch weiter optimiert werden kann. Wie bereits in Kapitel 4.1.3.2 näher erläutert, wäre eine Möglichkeit

das Sandstrahlen der Metallkomponente vor dem Fügen mit der Kunststoffkomponente.

In Abbildung 124 kann tatsächlich die Kraftübertragung durch das Sandstrahlen optimiert werden. Im Zugversuch konnte die Kraftübertragung im Vergleich mit den anderen Analysen am wenigsten, um ca. sieben Prozentpunkte, gesteigert werden. Die größte Steigerung konnte im G_{1C} Versuch erreicht werden mit ca. 30 Prozentpunkten. Die Dreipunktbiegung liegt mit ca. 21 Prozentpunkten dazwischen. Im Netzdiagramm ist allerdings nicht die große Standardabweichung der G_{1C} Versuche, wie in Abbildung 102, zu erkennen. Daher ist es schwierig hier eine zuverlässige Aussage über die Wirkung der Optimierung zu treffen.

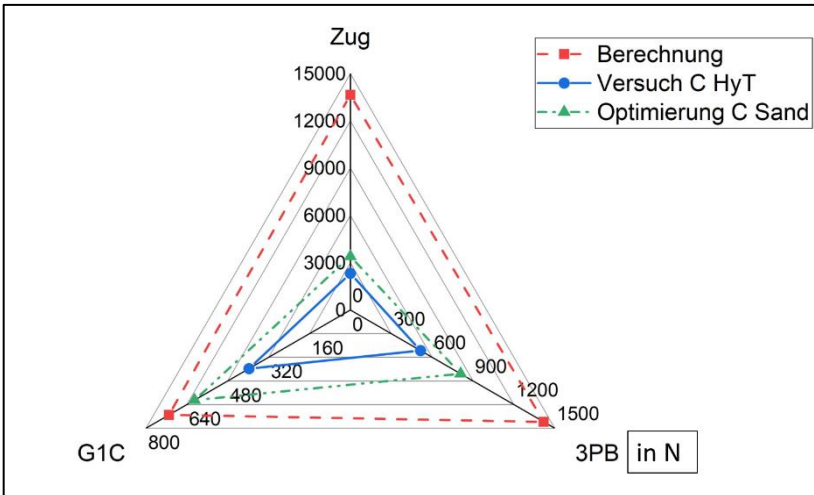


Abbildung 124: Gegenüberstellung der berechneten maximalen Kraft, der Optimierung durch Sandstrahlen und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem 0/90° Lagenaufbau von C HyT in N

Grundsätzlich gilt aber natürlich, dass das Sandstrahlen eine Vergrößerung der Oberfläche und damit eine Art Mikrostrukturierung erzeugt. Dadurch können die Adhäsionskräfte vergrößert werden. Ebenfalls werden die scharfkantigen Strukturen mittels Sandstrahlen

geglättet, sodass bei Probenherstellung weniger Fasern zerschnitten werden.

Außerdem gilt, wie bereits in Kapitel 4.1.4 erörtert, dass nicht der komplette Raum hinter den Strukturen mit Fasern ausgefüllt ist. Daraus resultiert ein lokaler geringerer Faservolumengehalt als im restlichen Teil des Kunststoffteils. Somit können auch nur weniger Fasern die Kraft übertragen und die resultierende Kraft ist geringer als die berechnete Kraft.

Der Faservolumenanteil der Kunststoffkomponente könnte aber grundsätzlich durch das eingesetzte Verfahren noch erhöht werden. Ein RTM oder Autoklav Verfahren könnten den Faservolumengehalt in den Proben und damit auch lokal an den Stellen hinter den Strukturen erhöhen. Hier müsste allerdings noch Optimierungsarbeit in die Anpassung dieser Verfahren auf die Geometrie investiert werden, da ein automatisiertes Verfahren die Ablage der Fasern hinter die Strukturen nicht vereinfacht.

5 Handlungsempfehlung und Optimierung

5.1 Handlungsempfehlung zur Herstellung dieser innovativen Hybridverbindung

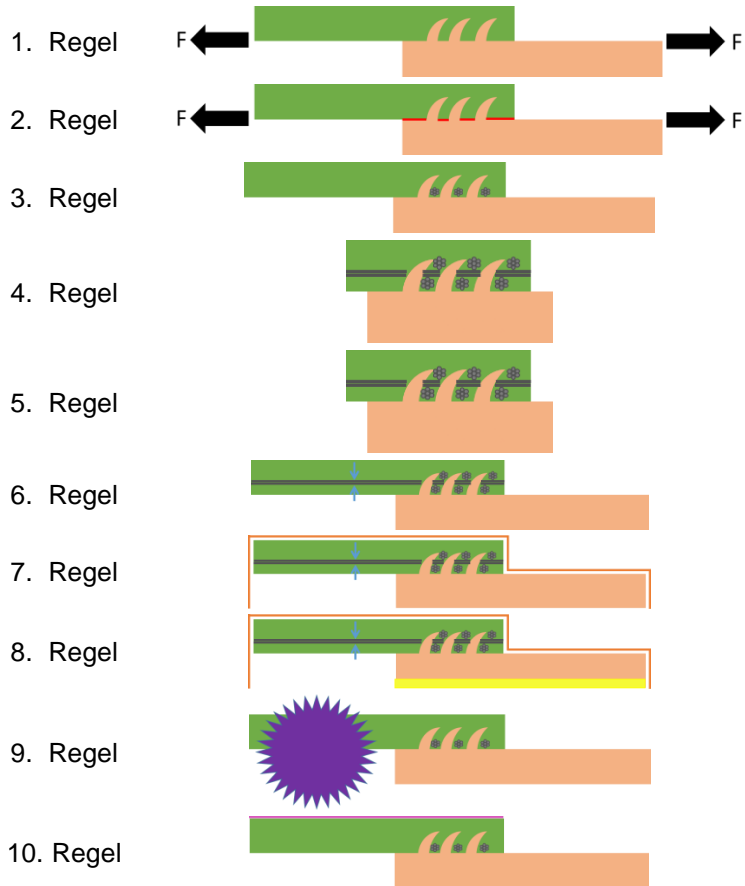
Die Strukturen konnten reproduzierbar mittels gehärteten Werkstoffs mit der C-Bügel Ständermaschine der Firma ECKOLD hergestellt werden. Es ist zu empfehlen, diese Strukturierung beizubehalten.

Allerdings könnten die Strukturierung bzw. die Wahl des Werkzeuges je nach Werkstoff variieren. Aluminium ist ein vergleichsweise weiches Metall. Härtere Werkstoffe erfordern voraussichtlich härtere Werkzeuge. Vorversuche können helfen, die richtige Wahl für das Werkzeug zu finden.

Grundsätzlich gilt es die Strukturen entlang des Lastpfades eines Bauteils aufzubringen. Dabei muss beachtet werden, dass sie um 180 ° entgegengesetzt der Krafrichtung eingebracht werden. Des Weiteren muss im Vorfeld geklärt werden, welche Faserart am besten verwendet wird. Kohlenstofffasern können die größten Zugkräfte übertragen, Glasfasern haben einen niedrigen Elastizitätsmodul.

Unabhängig von der Faserart müssen bei der Herstellung des Bauteils aber gewisse Regeln eingehalten werden. Diese Regeln werden im Folgenden aufgezählt und näher erläutert. Zur Übersichtlichkeit wurden schematische Zeichnungen in Tabelle 4 erstellt. Auf Beschriftungen der einzelnen Zeichnungen wurde an dieser Stelle verzichtet, da die Erläuterung unter den einzelnen Regeln erfolgt.

Tabelle 4: Übersicht der Regeln zur Gestaltung einer Hybridverbindung mittels schematischer Zeichnungen



1. Regel: Strukturanordnung lastpfadgerecht

Grundsätzlich müssen die Strukturen um 180° entgegen der Zugbeanspruchung aufgebracht werden. Sollte es sich um wechselseitig auftretende Beanspruchungen handeln, kann das Bauteil auch abwechselnd in entgegengesetzte Richtung strukturiert werden.

1. Regel: Vorbehandlung

Je nachdem, welche Faserart verwendet wird, kann es sich anbieten, das Blech vorzubehandeln. Die Vorbehandlung kann beispielsweise das Strahlen der strukturierten Oberfläche beinhalten. Denkbar ist auch ein Haftvermittler, der die Faseranbindung während des Belegens im VARI Aufbau gegen Verrutschen sichert. Des Weiteren können auch Schutzschichten, z.B. gegen Korrosionsschutz, aufgebracht werden. Bei der Verwendung von Stahl kann z.B. eine KTL (**K**athodische **T**auch**L**ackierung) Korrosion verhindern. Denkbar wäre auch ein Harzsystem, das optimal am Aluminium anbindet.

2. Regel: Formschluss beachten

Beim Belegen der Metallseite ist es wichtig, dass die Fasern hinter bzw. unter die Strukturen greifen. Dazu ist eine Schub-/Druckkraft erforderlich, die hier bisher händisch realisiert wurde. Bei sehr großen Stückzahlen ist dieser Vorgang eventuell auch automatisiert zu bewerkstelligen.

3. Regel: Kraftübertragung der Fasern berücksichtigen

Bei der Faserablage ist zu beachten, dass die Fasern nur Kraft zur Metallkomponente übertragen können, wenn sie hinter die Strukturen greifen. Insofern muss über einen Lagenaufbau nachgedacht werden, der das gewünschte anisotrope Verhalten aufweist, da ein symmetrischer Aufbau auch hier eingehalten werden muss, siehe nachfolgende Regel 4.

4. Regel: Symmetrischer Faserlagenaufbau

Ein symmetrischer Faserlagenaufbau muss unbedingt eingehalten werden, da sich die Kunststoffkomponente sonst auf dem Metall aufwölben und nicht mehr hinter die Strukturen für eine optimale Kraftübertragung greifen kann. Es sei denn, es ist gewünscht diesen Effekt auszunutzen, bei z.B. gekrümmten Oberflächen. In dem Fall

muss aber berücksichtigt werden, dass die Krümmung des Laminats mit der Krümmung der Metalloberfläche übereinstimmt. Ansonsten liegen die beiden Komponenten nicht direkt aneinander zur größtmöglichen Krafteinleitung.

5. Regel: Fasermatten fixieren

Ein Fixieren der Fasermatten verhindert ein Verrutschen während des weiteren VARI Aufbaus im Allgemeinen und während des Infusionsvorganges im Speziellen.

6. Regel: VARI Aufbau

Das Abreißgewebe muss größer als das Bauteil sein, wobei hingegen die Fließhilfe deutlich weniger, also ca. ein Drittel der faserverstärkten Fläche einnimmt. So kann gewährleistet werden, dass das Bauteil einfach entformt werden kann.

7. Regel: Abstandshalter zwischen mehreren Teilen

Werden mehrere Metallkomponenten mit den gleichen Fasermatten belegt, können Kabelbinder o.ä. als Abstandshalter dienen. Nach dem Entformen ist unbedingt darauf zu achten diese vor dem Trennen zu entfernen.

8. Regel: Trennvorgang

Der Trennvorgang einzelner Bauteile sollte möglichst ohne Wärmewirkung und mit möglichst wenig Vorschub stattfinden. In dieser Arbeit hat sich eine Präzisionssäge (DIADISC 4200, von Mutronic®) mit einem Diamantsägeblatt bewährt.

9. Regel: Nachbehandlung

Sofern die FVK Seite, wie in der **Regel** beschrieben, getrennt wurde, besteht kein Bedarf diese Seite nachzubehandeln, da keine scharfen

Kanten o.ä. vorzufinden sind. Sollte jedoch eine geeignete Farb- bzw. Lackschicht gewünscht sein, kann diese unter Einhaltung der Herstellerangaben aufgebracht werden. Wichtig ist dabei, darauf zu achten, dass kein Druck auf die Strukturen ausgeübt wird, um sie nicht zu beschädigen.

5.2 Optimierung

Um den Prozess dieser innovativen Hybridverbindung zu optimieren, können die Strukturen automatisiert hergestellt werden, indem z.B. mehrere Werkzeuge gleichzeitig das Metall strukturieren. Dabei muss stets der Verschleiß der Werkzeuge im Auge behalten werden. Sobald an einem Werkzeug Verschleiß beobachtet wird, muss dieses unverzüglich ausgetauscht werden, da die Strukturen an dieser Stelle sonst anders ausfallen als die anderen.

Des Weiteren ist die automatisierte Fasermattenablage, z.B. mittels eines Roboterarmes, vorstellbar. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Fasern unter die Strukturen geschoben werden. Insofern muss eine Abwärts- und Seitwärtsbewegung des Roboterarmes berücksichtigt werden.

Beim Infusionsverfahren ist statt des VARI Aufbaus auch ein RTM (Resin Transfer Moulding, siehe Abbildung 125) möglich. Dabei findet das gesamte Infusionsverfahren innerhalb eines zweischaligen Werkzeuges statt. Der Strukturierungsprozess könnte dabei in den Formgebungsprozess integriert werden.

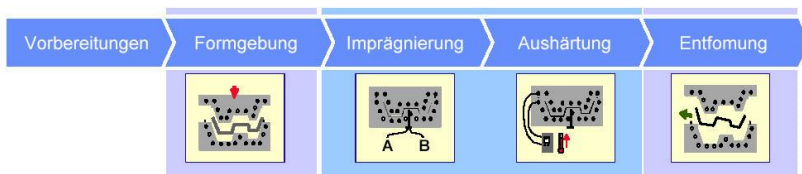


Abbildung 125: RTM Prozess, schematisch

Eventuell wäre es auch möglich einen Preform herzustellen, der dann im RTM Prozess eingearbeitet wird. Dabei könnte die Form der Strukturen bereits beim Herstellen des Preforms derart berücksichtigt werden, dass eine einfache, hinter greifende Ablage ermöglicht wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die Charakterisierung der Metall-Kunststoff-Hybridproben konnte erfolgreich bearbeitet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests konnten die neue Werkstoffkombination bzw. deren Verbindung charakterisieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Kombination des strukturierten Aluminiumbleches mit CFK die größten Kräfte überträgt. Dies konnte in allen Analysen bestätigt werden. Dennoch kann die neue Hybridverbindung nicht die referenzierte Nietverbindung ersetzen. Zum einen können nicht die gleichen Kräfte übertragen werden und zum anderen ist die Verbindung nicht Fail-Safe geeignet, da die beiden Komponenten nach Versagen nicht mehr miteinander verbunden sind und sich einfach voneinander lösen lassen. In einer Fail-Safe Anwendung müssen Bauteile so konstruiert sein, dass sie im Versagensfall nur einen minimal möglichen Schaden verursachen. Für definierte Anwendungen wird das maximal mögliche Versagen der Werkstoffe bestimmt. Die dazugehörigen Auswirkungen dürfen aber nur einen minimalen Schaden des Bauteils, der Maschine oder der Anlage bewirken. Ist dieses Zusammenspiel nicht mit dem Werkstoff möglich, muss ein anderer Werkstoff oder Werkstoffverbindung definiert werden.

Das Versagensverhalten dieser hybriden Werkstoffverbindung hat jedoch den Vorteil, dass die beiden Komponenten getrennt voneinander dem Recyclingkreislauf zugeführt werden können. So kann die Metallkomponente umgeformt und neu verwendet werden. Auch das FVK kann dem Recycling zugeführt werden damit die Fasern erneut verwendet werden können. Bei einer Klebung hingegen wäre dies nicht ohne einen zwischengeschalteten Prozess möglich.

Des Weiteren wurde auch noch nicht das theoretische Kraftpotenzial in Zugrichtung ausgeschöpft, sondern nur 53 %. Mittels der optimierten Variante mit einer Sandstrahlung steigerte sich allerdings die

Kraftübertragung um mehr als das Anderthalbfache (statt nur 53 % eine Ausschöpfung von ca. 83 % des Kraftpotenzials).

Mit den Biegeversuchen wurde gezeigt, dass es einen Einfluss hat, wo die Druckkraft angreift. Sofern die Strukturen nicht direkten Druck erfahren, können höhere Kräfte übertragen werden.

Mit der Hybridverbindung ist eine ähnlich hohe Energiefreisetzungsrate wie bei den monolithischen Materialien erreicht worden.

Je nach Einsatzgebiet müssen evtl. weitere Tests hinzugezogen werden, um eine gute Beurteilung der Einsatzfähigkeit der Hybridverbindung vorzunehmen.

Eine Handlungsempfehlung in Form eines Regelwerkes zu Herstellung hybrider Bauteile wurde im Anschluss an die Analysen aufgezeigt.

Grundsätzlich wäre die Verbindung im Einsatz in industriellen Anwendungen wie der Verkleidung vom Innenraum eines PKW geeignet. Um Geräusche bzw. Vibrationen zu minimieren (siehe auch Kapitel 6.2), ist die Verkleidung von Metallen mittels Kunststoffs besonders geeignet. Auf Grund der Strukturierung lässt sich das Metall mit beliebigem Kunststoff kombinieren.

6.2 Ausblick

Neben den in Kapitel 5.2 formulierten Möglichkeiten zur Optimierung des Prozesses müssen Tests erfolgen, inwiefern gekrümmte Oberflächen für die Anwendung dieser Hybridverbindung genutzt werden können. Erste Versuche wurden mittels Wickelverfahren bereits unternommen. Hier besteht allerdings noch erheblicher Optimierungsbedarf hinsichtlich lastpfadgerechter Auslegung, gerade in Bezug auf Torsion. In Abbildung 126 sind drei Beispielrohre dargestellt, die vor dem Umwickeln mit GFK strukturiert worden sind.

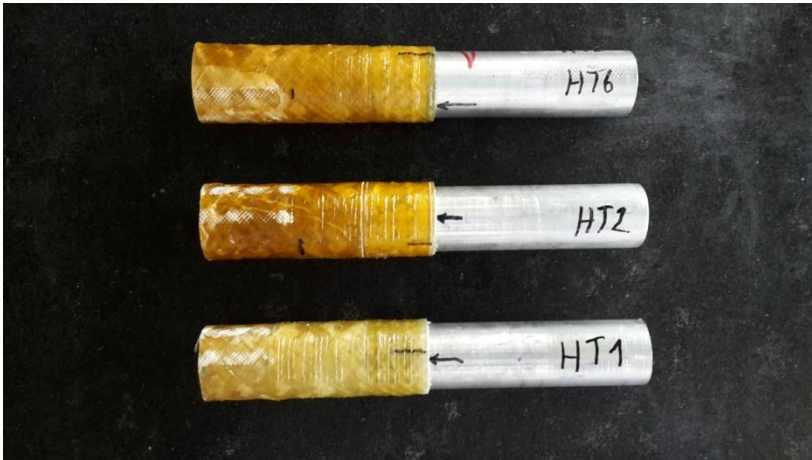


Abbildung 126: Mit dem Wickelverfahren umwickelte Rohre mit innovativer Hybridverbindung

Abbildung 127 zeigt einen Querschnitt durch die Längsachse des gewickelten GFK Teils und ein teilweise strukturiertes Rohr. Die Wicklung wurde mit $\pm 45^\circ$ vierlagig mit Glasfasern vom Coil (HYB-ON 6800 von PPG Sinoma Jinjing Fiber Glass Company Ltd.) mit der Wickelmaschine FWA 1/4/1 von Bolenz und Schäfer hergestellt. Als Harzsystem wurde das Harz Araldite LY556 und der Härter XB 3585 benutzt. Das Rohr bestand aus einer AlMgSi0 5 Aluminium Legierung.

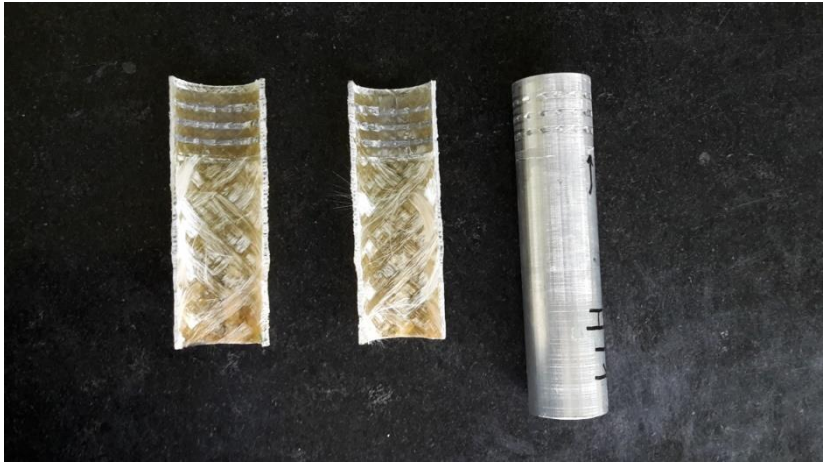


Abbildung 127: Entlang der Längsachse aufgeschnittene GFK Komponente und strukturiertes Aluminium Rohr

Für eine großflächige, industrielle Anwendung ist es sinnvoll eine Norm für Hybridwerkstoffe zu haben. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit (z.B. Vergleich versetzte Einspannung in Zugversuch und Dreipunktbiegung) wurden mögliche Einschränkungen aufgezeigt. Das Regelwerk zur Herstellung zeigt, dass in einer solchen Norm auch Herstellparameter berücksichtigt werden müssen. Zunächst einmal muss eine Standardprobe festgelegt werden, an Hand derer die mechanischen Belastungen analysiert werden können. Erst im Anschluss daran können neue Normen auf den Weg gebracht werden. Wichtig wären zunächst Normen für Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung sowie die Energiefreisetzungsrate. Weitere Normen sollten im Anschluss folgen.

Anwendungsbereiche dieser Strukturen wären, wie schon in Kapitel 2.5 erwähnt, der Innenbereich eines Automobils. Beispielsweise kann hier die Metallseite in Richtung der Außenhaut des Fahrzeugs angebracht werden, um ggf. schweißbar verarbeitet werden zu können. Währenddessen kann im Innenraum das optisch auch

sehr ansprechende CFK verwendet werden, um die Vibrationen, die durch das Metall weitergeleitet werden, zu dissipieren.

Außerdem hat sich gezeigt, dass die Strukturreihen nacheinander versagen. Somit könnten die Strukturen an einer Art Opferbauteil so angebracht werden, dass sie bei Übersteigen einer bestimmten Kraft nacheinander versagen, um die Kraft Stück für Stück abzuschwächen. Auf die Art und Weise könnte z.B. eine Welle hergestellt werden, an der die Strukturen lastpfad- und torsionsgerecht angebracht wurden. Beim Aufbringen zu großer Kräfte versagen die Strukturen nacheinander. Das Getriebe wird somit von den Kräften verschont und erleidet dadurch keinen Schaden. Nach dem Austausch der Welle kann dann der Betrieb wie gewohnt fortgesetzt werden.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

1. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. BMU. <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>. [Online] [Zitat vom: 04. 11 2019.]
2. Bundesamt, Umwelt.
3. Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates. 23.04.2009.
4. e.V., VDI. *Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung*. Düsseldorf : VDI e.V., 2014.
5. Erhard Hornbogen, Hans Warlimont. *Metalle- Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. s.l. : Springer, 2006.
6. Wikibooks.
https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Innerer_Aufbau/_Gitterfehler. [Online] [Zitat vom: 07. 11 2019.]
7. Weißenbach, M.D.C.J. Wolfgang. *Werkstoffkunde*. s.l. : Springer Vieweg , 2015.
8. Frank Rieg, Rolf Steinhilper. *Handbuch Konstruktion*. s.l. : Hanser, 2018. 978-3-446-45224-4.
9. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6779>. [Online] 12. 08 2019.
10. Bergmann, Wolfgang. *Werkstofftechnik, Teil 1: Grundlagen*. s.l. : Hanser, 2008.
11. <https://docplayer.org/51289309-li-werkstofftechnik-a-innerer-aufbau-der-metalle.html>. [Online] [Zitat vom: 12. 08 2019.]
12. <https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html>. [Online] [Zitat vom: 12. 08 2019.]
13. <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/aluminium/383-eigenschaften-alu>. [Online] [Zitat vom: 12. 08 2019.]
14. Bonnet, m. *Kunststofftechnik*. s.l. : Springer Vieweg, 2016.
15. C. Hopmann, W. Michaeli. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München : Hanser, 2015.
16. Kolzenburg, M.M.O.N. Sebastian. *Polymere*. s.l. : Springer Spektrum, 2014.
17. H. Saechtling, E. Baur. *Saechtling-Kunststoff-Taschenbuch*. München : Hanser, 2007.
18. e.V., I.V.K. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. s.l. : Springer Vieweg, 2014.

19. Schürmann, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. s.l. : Springer, 2007.
20. Zeilinger, H. Verbund- und Hybridwerkstoffe, Definition, Zusammensetzung, Anwendung. *Konstruieren mit Verbund- und Hybridwerkstoffen*. s.l. : VDI Verlag, 1985.
21. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-08-03192>. [Online] [Zitat vom: 25. 09 2019.]
22. Skolaut, W. *Maschinenbau*. s.l. : Springer Vieweg, 2018.
23. Hanks, Fabian.
http://www.radolid.de/uploads/media/Korrosionsschutz_CFK_01.pdf. [Online] RADOLID Thiel GmbH. [Zitat vom: 05. 11 2019.]
24. Flemming, S.R. Manfred. *Faserverbundbauweisen-Eigenschaften*. s.l. : Springer, 2003.
25. https://lightweight.vdma.org/documents/266675/26503513/2018_07_04_Leitfaden_Erste_Aktualisierung_1530860642221.pdf/56a0360f-dd63-44ad-770d-249b624389a4, 23.09.2019.
26. Dipl.-Ing. Saskia Müller, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Brand, Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners, Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder. *Mechanische Strukturierung für hochfeste Metall-Kunststoff-Hybride – HyTensile*. Frankfurt : Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (Verlag), 2017.
27. Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Mehrschichtverbundrohr>. [Online] [Zitat vom: 07. 11 2019.]
28. *An Experimental Study on the Impact Resistance of Glass-Fiber-Reinforced Aluminum (Glare) Laminates*. Mohammed Alemi Ardakani, Akbar Afaghi Khatibi, Hady Parsaiyan. Edinburgh : ICCM, 2009.
29. M. Gruzicic, V. Sellappan, G. Arakere and J.M. Ochterbeck. Investigation of a polymer metal inter-locking technology for use in load-bearing automotive components. *Multidiscipline Modeling in Materials*. 2010, S. 23-44.
30. K. Won-Seock, Y. Il-Han, L. Jung-Ju, J. Hee-Tae. Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer–metal interfaces using micro-patterned surface topography. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 6, 2010, Bd. 30, S. 408-417.
31. J. Byskov-Nielsen, J. V. Boll, A. H. Holm, R. Hojsholt, P. Balling. Ultra-high-strength micro-mechanical interlocking by injection molding into laser-structured surfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 30, 09 2010, Bd. 6, S. 485-488.

32. Beyer, Ulrike. Herstellung eines Metall-Kunststoff-Verbundes mit der Flach-Clinch-Technologie. *www.utfscience.de* 1/2011. [Online] 2011.
33. K. Schricker, M. Stambke, J. P. Bergmann, K. Bräutigam, P. Henckell. Macroscopic Surface Structures for Polymer-metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining. *Physics Procedia*. 56, 2014, S. 782-790.
34. Lambiase, F. Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching. *Int J Adv Manuf Technologie*. 80, 2015, S. 1995-2006.
35. H. Paul, M. Luke, F. Henning. Combining mechanical interlocking, force fit and direct adhesion in polymer-metal-hybrid structures – Evaluation of the deformation and damage behavior. *Composites Part B: Engineering*. 73, 2015, S. 158-165.
36. T. Mok Gwon, J. Ho Kim, G. Jin Choi, S. June Kim. Mechanical interlocking to improve metal-polymer adhesion in polymer-based neural electrodes and its impact on device reliability. *J Mater Sci*. 51, 2016, S. 6897-6912.
37. E. Rodriguez-Vidal, C. Sanz, C. Soriano, J. Leunda, G. Verhaeghe. Effect of metal micro-structuring on the mechanical behavior of polymer-metal laser T-joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 229, 2016, S. 668-677.
38. Straeten, K. van der. KUNSTSTOFF-METALL-HYBRIDE DURCH MIKRO- UND NANOSTRUKTURIERUNG MIT ULTRAKURZPULSLASERN. *Fraunhofer Jahresbericht*. 2016, S. 77.
39. <https://www.kunststoffe.de/fachinformationen/technik-trends/artikel/5464818>. [Online] [Zitat vom: 16. 12 2019.]
40. Y. Xie, J. Zhang, T. Zhou. Large-area mechanical interlocking via nanopores: Ultra-high-strength direct bonding of polymer and metal materials. *Applied Surface Science*. 492, 30. 10 2019, S. 558-570.
41. K2019. <https://www.leichtbauwelt.de/k2019-einweg-klettverschluss-fuer-metalleinleger/>. [Online] [Zitat vom: 16. 12 2019.]
42. A. Ozlati, M. Mo-vahedi, M. Tamizi, Z. Tartifzadeh, S. Alipour. An alternative additive manufacturing-based joining method to make Metal/Polymer hybrid structures. *Journal of Manufacturing Processes*. 45, 09 2019, S. 217-226.

43. M. Rawa, D. Kuttner. Stoffschlüssiges Fügen von faserverstärkten Duroplast-Thermoplast-Hybriden. *Lightweight Design*. 11, 2018, S. 14-21.
44. H. Paul, M. Luke, M. Reif, F. Henning. Bewertung des Verformungs- und Versagensverhaltens von langfaserverstärkten Kunststoff-Metall-Hybridverbunden. 2011.
45. Fibre. http://www.faserinstitut.de/wp-content/uploads/2017/07/Projektflyer_SchwarzSilber_2016.pdf. [Online]
46. https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Formgebung_Funktionswerkstoffe/Giesserei-Technologie/cfk-aluminium-strukturen_fraunhofer_ifam.pdf. [Online]
47. Wolfsburg, Fraunhofer Projektzentrum. <https://www.hybridleichtbau.fraunhofer.de/de/forschung/HyDru.html>. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
48. *Hybridisierung mittels Niederdruckguss, Projekt HyDru*. Auwera, R. Van der. Braunschweig : Arbeitskreissitzung der Open Hybrid Labfactory, 2015.
49. Technologie, Austrian Institut of. https://www.fill.co.at/uploads/blog_download/243_434_leichtmetallentwicklungenfuerhybrideleichtbauloesungen.pdf. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
50. *Großserientaugliche Prozessketten für hochintetrierte Bauteile aus hybriden Faser-Kunststoff-Metall-Verbunden, Teilprojekt 6 Anbindungstechnologien, DFG-AIF Cluster*. Kropp, T. Clausthal : EFB Arbeitskreissitzung, 2016.
51. Mair, Josef. https://portal.mytum.de/index_test/pressestelle/pressemitteilungn/news_article.2009-09-02.2452535930. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
52. —. https://portal.mytum.de/pressestelle/tum_mit/2007nr4/61.pdf. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
53. Elisabeth Stammen, Stefan Böhm, Klaus Dilger, Christian Lammel. Laser-vorbehandlung in der klebtechnischen Serienfertigung. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*. 49, 2005, S. 51-55.
54. Blackburn, Jonathan und Hilton, Paul. Producing Surface Features with a 200 W Yb-fibre Laser and the Surfi-Sculpt® Process. *Physics Procedia*. 2011, S. 529-536.

55. *Pulsed Laser Surface Pre- Treatment of Aliminum to Join Aluminum-Thermoplastic Hybrid Parts*. André Heckert, Christian Singer, Michael F. Zaeh. s.l. : Lasers in Manufacturing Conference, 2015.
56. Innovative mechanical bonding technology for lightweight hybrid composites. [Hrsg.] ITS automotive nord e.V. *Faszination hybrider Leichtbau*. 2016, S. 134-157.
57. <https://www.gripmetal.com/about-us/#>. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
58. Goldbach, H. Pkw- Tür aus Kunststoff-Stahlblech-Verbund. *Kunststoffe*. 81, 1991, S. 634-637.
59. <https://www.lkt.tf.fau.de/forschung/forschungsschwerpunkte/leichtbau-und-fvk/kunststoff-metall-hybridtechnik/>. [Online] [Zitat vom: 23. 09 2019.]
60. http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/SPP-1712/php/projekt_01.php. [Online] [Zitat vom: 24. 09 2019.]
61. 330043166, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer.
62. <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/grundlagen-des-klebens-erklaert-voraussetzung-adhaesion-kohaesion-a-794496/>. [Online] [Zitat vom: 24. 06 2019.]
63. 527-5, DIN EN ISO. *Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften- Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5:2009)* Deutsche Fassund EN ISO 527-5:2009. 2010.
64. Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie. <https://www.krv.de/artikel/elasticitaetsmodul-e-modul>. [Online] [Zitat vom: 9. 12 2019.]
65. DIN EN ISO 14125. *Faserverstärkte Kunststoffe- Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125:1989 + Cor.1:2001 + Amd. 1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011*. 2011.
66. Polymerservice Merseburg. <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Biegefestigkeit>. [Online] [Zitat vom: 09. 12 2019.]
67. Polymerservice Merseburg. https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Datei:R_Kurve_Elastomere-5.JPG. [Online] [Zitat vom: 09. 12 2019.]
68. DIN EN 6033. *Luft- und Raumfahrt- Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe-Prüfverfahren-Bestimmung der interlaminaeren*

- Energiefreisetzungsrates Mode I- GIC; Deutsche und Englische Fassung EN 6033:2015.* 2016.
69. Composite-Wiki, R & G. https://www.r-g.de/wiki/Verst%C3%A4rkungsfasern_-_Einf%C3%BChrung_und_%C3%9Cberblick. [Online] [Zitat vom: 09. 12 2019.]
70. 6892-1, DIN EN ISO. Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016) Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016. 2017.
71. Li, Shuguang & Sitnikova, Elena & Liang, Yuning & Kaddour, A S. The Tsai-Wu Failure Criterion Rationalised in the Context of UD Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017.
72. W. D. Callister, D. G. Rethwisch. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. s.l. : Wiley-VCH, 2012. S. 591.
73. zur Verfügung gestellt durch ar engineers GmbH und Prof. Dr.-Ing. Michael Seibel, HAW Hamburg.
74. Umwelt Bundesamt.
78. <http://www.periodensystem.info/periodensystem/>. [Online] [Zitat vom: 12. 08 2019.]
80. T. Mok Gwon, J. Ho Kim, G. Jin Choi, S. June Kim. Mechanical interlocking to improve metal–polymer adhesion in polymer-based neural electrodes and its impact on device reliability. *J Mater Sci.* 51, 2016, S. 6897-6912.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Hybridverbindung, Abmaße in mm	IX
Abbildung 2: Materialzusammensetzung eines Pkw im zeitlichen Vergleich. (4)	3
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Bändermodells, welches die elektrische Leitfähigkeit von Metallen beschreibt (9).....	7
Abbildung 4: Typische Kristallstrukturen der Metalle (11)	8
Abbildung 5: Schematischer molekularer Aufbau von Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren nach (15)	10
Abbildung 6: Probe der Firma RADOLID Thiel GmbH nach Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227 (23). Auf der rechten Probenseite ist deutlich Korrosion zu erkennen.	15
Abbildung 7: Schema des Mehrschichtverbundrohres (27)	18
Abbildung 8: Aufbau GLARE (28)	19
Abbildung 9: CFK-Aluminium-Hybridverbindung des DFG Projekts Schwarz-Silber (46)	23
Abbildung 10: Anbindungskonzept der DFG Forschergruppe 1224 „Schwarz – Silber“ (45)	24
Abbildung 11: Probekörper aus dem Projekt HyDru (48)	25
Abbildung 12: Im CMT Verfahren aufgeschweißte Pins (49)	25
Abbildung 13: Verschiedene Ausführungen möglicher Pins (49)	26
Abbildung 14: Kugelpins (49)	26
Abbildung 15: Zylinderpins (49)	26
Abbildung 16: Selbstlochende PIN-Elemente (50)	27
Abbildung 17: Geprägte Pinelemente (50)	28
Abbildung 18: Metaklett®, Entenkopf (51)	28
Abbildung 19: Metaklett® mit Metallfasern (52)	29
Abbildung 20: REM Aufnahmen von Aluminiumoberflächen mit verschiedenen Laserbehandlungen (55)	30
Abbildung 21: GRIP Metal™ - Anwendungsfälle (56)	31
Abbildung 22: GRIP Metal™ verschiedene Werkstoffe (57)	31
Abbildung 23: GRIP Metal™ mit CFK verbunden (57)	32
Abbildung 24: Erlanger Träger aus Stahl mit Rippen aus Polyamid 6 (59)	33
Abbildung 25: Titan Niet HiLok von Hi-Shear Corporation	33
Abbildung 26: Anschauungsbeispiele Multilayerinserts (MLI) (60) ..	35
Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Sandwichverbundes	37

Abbildung 28: FEM Simulation von PA6 galvanisiertem Stahlhybriden	37
Abbildung 29: Schematischer Aufbau einer Klebung (62)	38
Abbildung 30: Geometrische Abmaße der Kunststoffseite in mm, schematisch	40
Abbildung 31: Geometrische Abmaße der Metallseite in mm, schematisch	40
Abbildung 32: Geometrische Abmaße der Hybridverbindung im mm, schematisch	41
Abbildung 33: Strukturierungswerkzeug	41
Abbildung 34: Universelle, hydraulische C-Bügel-Ständermaschine DFG 500/150 der Firma ECKOLD GmbH & Co. KG	42
Abbildung 35: Aluminium Blech nach Strukturierung	43
Abbildung 36: Schnitt durch die erzeugten Strukturen.	43
Abbildung 37: Aufsicht Einzelstruktur mittels Laserscanningmik- roskop (Keyence, VK-X1000)	44
Abbildung 38: VARI Aufbau, schematisch	45
Abbildung 39: Lagenaufbau 0°/90°	46
Abbildung 40: Lagenaufbau +/- 45°	46
Abbildung 41: Roving hinter einer Struktur, schematisch, Seitenansicht	47
Abbildung 42: Roving hinter Strukturen, Draufsicht	47
Abbildung 43: Fertiggestellter VARI Aufbau	50
Abbildung 44: Abmaße der fertiggestellten Proben, schematisch... ..	51
Abbildung 45: Fertiggestellte Probe Ansicht a	52
Abbildung 46: Fertiggestellte Probe, Ansicht b	52
Abbildung 47: Fertiggestellte Probe, Seitenansicht	52
Abbildung 48: Spannungs-/Dehnungsdiagramm eines Zugversuchs für die drei Kunststoffklassen (rot=Duomer, blau=Thermoplast, gelb=Elastomer) (63)	54
Abbildung 49: Schematische Darstellung der Krafteinleitung während der Zugprüfung	55
Abbildung 50: Beispiel Einspannung Zugversuch	56
Abbildung 51: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm mittels Dreipunktbiegung für die drei Kunststoffklassen (A, blau=Duomer, B, rot=Thermoplast, C, grün=Elastomer) (65)	57
Abbildung 52: Schema der Krafteinleitung während der Dreipunktbiegeprüfung	58
Abbildung 53: Einspannung Dreipunktbiegung	59

Abbildung 54: Beispiel eines Kraft-Wege-Verlaufs einer G_{IC} Messung (66).....	60
Abbildung 55: Schema der Krafteinleitung während der Messung der interlaminaren Energiefreisetzungsrate.....	62
Abbildung 56: Beispiel einer eingespannten, strukturierten CFK Probe, links vor der Prüfung, rechts während der Prüfung	62
Abbildung 57: Vergleich der eingesetzten Faservarianten, hier im Beispiel mit Glasfasern im Zugversuch	70
Abbildung 58: Zugversuche mit Hybridproben bestehend aus Aluminium und PA6, PA6GF30 und GMT im Vergleich mit kohlenstofffaserverstärkten Proben in 0/90° Ausrichtung	71
Abbildung 59: Schnittbild einer Hybridprobe mit Thermoplast PA6, 20fache Vergrößerung.....	72
Abbildung 60: Getestete, normgerechte Zugprobe des Aluminium 2017	74
Abbildung 61: Vergleich der monolithischen Aluminiumproben im Zugversuch	74
Abbildung 62: Zugversuche monolithische, strukturierte Aluminiumprobe	75
Abbildung 63: Zugversuch GFK (G solo)	76
Abbildung 64: Vergleich der hier verwendeten Geometrie (G solo, C solo) mit der Probengeometrie nach Norm.....	76
Abbildung 65: Nietteile	78
Abbildung 66: Nietverbindung	78
Abbildung 67: Befestigen der Nietverbindung.....	78
Abbildung 68: Abscheren des Schraubkopfes	78
Abbildung 69: Fertiggestellte Nietverbindung	78
Abbildung 70: Beispiel getestete, geklebte CFK Probe	79
Abbildung 71: Beispiel getestete, sandgestrahlte Zugprobe CFK ...	80
Abbildung 72: Max. Zugkraft	81
Abbildung 73: Getestete CFK Nietverbindung im Zugversuch	82
Abbildung 74: Beispiel 0/90° Faserablage hinter einer Struktur	83
Abbildung 75: Beispiel +/-45° Faserablage hinter einer Struktur	83
Abbildung 76: Vergleich der HyT Proben	84
Abbildung 77: Mikroskopiebild mit C Fasern in 0/90° Richtung. Vergrößerung 100x.....	85
Abbildung 78: Mikroskopiebild mit C Fasern in +/-45° Richtung. Vergrößerung 30x.....	85
Abbildung 79: Seitenansicht Probe HyT	86

Abbildung 80: Vergleich versetzt und zentriert eingespannter Hybridproben zur Beurteilung der Krafteinleitung bei unterschiedlicher Einspannung	87
Abbildung 81: Bezeichnung der Strukturreihen	88
Abbildung 82: Kraft-Weg-Diagramm eines Zugversuchs, C HyT mit einer 0/90° Ausrichtung	89
Abbildung 83: Zugprobe nach Zugversuch, CFK.....	89
Abbildung 84: Vergleich Einfluss Sandstrahlen am Beispiel einer strukturierten Verbindung mit Kohlenstoffasern, Zugversuch.....	90
Abbildung 85: Kohlenstofffaser Roving.....	91
Abbildung 86: Kohlenstofffaser Roving, einmal hinter den unbehandelten Strukturen abgelegt	91
Abbildung 87: Kohlenstofffaser Roving, einmal hinter den sandgestrahlten Strukturen abgelegt	91
Abbildung 88: Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme einer sandgestrahlten C HyT Sand Probe (blau gestrichelt) mit einer C HyT Probe (grün)	92
Abbildung 89: Zuglastfall am Beispiel C solo +/-45	93
Abbildung 90: Mikroskopiebild einer Struktur mit CFK, Vergrößerung x50.....	97
Abbildung 91: Markierter Ausschnitt aus Abbildung 90	98
Abbildung 92: Max. Kraftübertragung bei der Dreipunktbiegung...	101
Abbildung 93: Dreipunktbiegeversuch C solo.....	102
Abbildung 94: Dreipunktbiegeversuch Alu HyT	102
Abbildung 95: Dreipunktbiegeversuch monolithische, strukturierte Aluminiumprobe, Draufsicht	103
Abbildung 96: Beispielprobe C HyT Dreipunktbiegung	103
Abbildung 97: Dreipunktbiegung, Ausrichtung Druckfinne auf mittlere Reihe	103
Abbildung 98: Dreipunktbiegung, Ausrichtung Druckfinne zwischen erster und zweiter Reihe	103
Abbildung 99: Vergleich der Einspannungen im Dreipunktbiegeversuch (mittig= C45/C90 HyT und eine halbe Reihe versetzt= C45/C90 HyT versetzt)	104
Abbildung 100: Lastfall am Beispiel C solo +/-45	105
Abbildung 101: Lastfall am Beispiel C solo 0/90.....	107
Abbildung 102: Max. Energiefreisetzungsrates, G_{1C}	109
Abbildung 103: G_{1C} Versuch GFK (G solo)	110
Abbildung 104: Lastfall am Beispiel C solo +/-45	111

Abbildung 105: Lastfall am Beispiel C solo 0/90	113
Abbildung 106: Mikroskopiebild mit C Fasern in +/-45° Richtung (C HyT +/-45) Vergrößerung 100x.....	115
Abbildung 107: Mikroskopiebild mit C Fasern in 0/90° Richtung (C HyT 0/90). Vergrößerung 100x.....	116
Abbildung 108: Mikroskopiebild mit G Fasern in +/-45° Richtung . Vergrößerung 100x.....	117
Abbildung 109: Mikroskopiebild mit G Fasern in 0/90° Richtung (G HyT 0/90). Vergrößerung 100x.....	118
Abbildung 110: Vermessung einer strukturierten Metallprobe nach der Herstellung von 10 Proben.....	119
Abbildung 111: Vermessung einer strukturierten Metallprobe nach der Herstellung von 200 Proben.....	119
Abbildung 112: Vergleich der max. Spannungen in Bezug auf die projizierte Fläche	121
Abbildung 113: 3D Vermessung einer Struktur mittels Laserscanningmikroskop (Keyence, VK-X1000) ..	122
Abbildung 114: Projizierte Fläche des Niets in mm.....	122
Abbildung 115: Ergebnisse der maximalen Zugkraft in N.....	124
Abbildung 116: Ergebnisse der maximalen Kraftübertragung bei der Dreipunktbiegung in N	125
Abbildung 117: Ergebnisse der Energiefreisetzungsraten im G_{1C} Versuch in J/m^2	126
Abbildung 118: Gegenüberstellung der berechneten und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem +/-45° Lagenaufbau von C HyT in N.....	127
Abbildung 119: Beispielprobe Dreipunktbiegung C HyT	128
Abbildung 120: Gegenüberstellung der berechneten Kraft und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem 0/90° Lagenaufbau von C HyT in N.....	129
Abbildung 121: Faserausrichtung eines Beispielrovings im 0/90° Aufbau.....	130
Abbildung 122: Faserausrichtung eines Beispielrovings im +/-45° Aufbau.....	130
Abbildung 123: Gegenüberstellung der berechneten maximalen Kraft, der Optimierung durch Sandstrahlen und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem +/-45° Lagenaufbau von C HyT in N.....	131

Abbildung 124: Gegenüberstellung der berechneten maximalen Kraft, der Optimierung durch Sandstrahlen und der gemessenen maximalen Kraft der Versuche Zug, 3PB und G_{1C} bei einem 0/90° Lagenaufbau von C HyT in N	132
Abbildung 125: RTM Prozess, schematisch	139
Abbildung 126: Mit dem Wickelverfahren umwickelte Rohre mit innovativer Hybridverbindung.....	142
Abbildung 127: Entlang der Längsachse aufgeschnittene GFK Komponente und strukturiertes Aluminium Rohr .	143

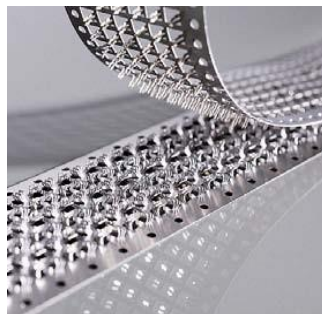
7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über den Stand der Wissenschaft	20
Tabelle 2: Serienbezeichnungen und ihre Bedeutung	67
Tabelle 3: Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe nach (68)	69
Tabelle 4: Übersicht der Regeln zur Gestaltung einer Hybridverbindung mittels schematischer Zeichnungen	135
Tabelle 5: Faservolumengehalt, Kalkulation	169

8 Anhang

8.1 Datenblatt Entenkopf

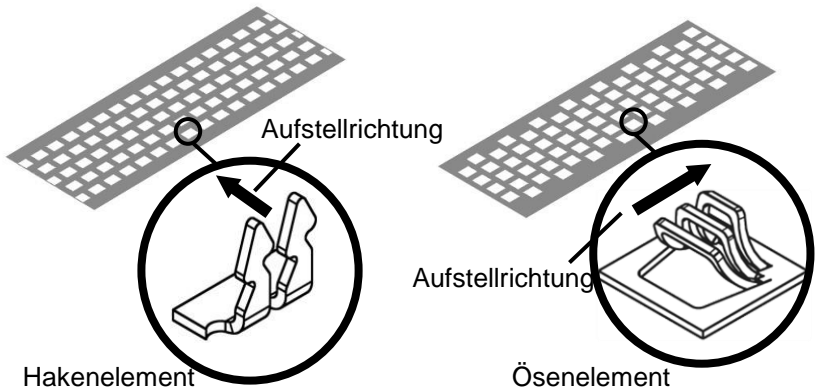
METAKLETT ist eine mehrfach lös- und fügbare metallische Klettverbindung, die in Umgebungen eingesetzt werden kann, in denen Kunststoffe an ihre Grenzen stoßen. Die Ausführung der Haken-Öse-Verbindung mit dem Hakenelement Entenkopf „HE1“ und dem Ösenelement Stanzflausch „SF1“ lässt sich in variierbarem Winkel von Hand an beliebiger Position montieren und per Schälzug oder Kopfbzug demonstrieren.



Werkstoffe

Haken „HE1“:	1.4310
Gegenstück „SF1“:	1.4310
Blechdicke t:	0,2 mm
Bandbreite b:	30 mm
Einbauhöhe montiert:	2,5 mm
Bandlänge l:	variabel ablängbar
Montagewinkel:	+ / - 20 ° in Bandlaufrichtung 180 ° verdrehbar
Eigenschaften:	1.4310 nach DIN 10088 rost- und säurebeständiger Chrom-Nickel-Stahl austenitisch, gut schweißbar

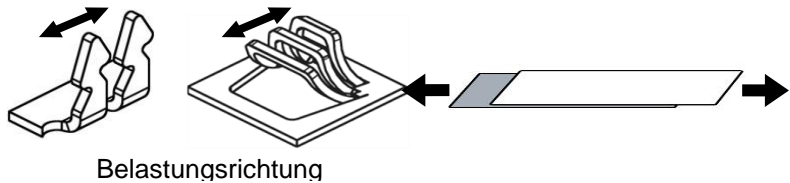
Geometriedefinition



Scherfestigkeitswerte der Verbindung in Längsrichtung

Prüfaufbau

Die 2 Klettstreifen werden jeweils in ein Backenfutter gespannt und in der Mitte auf einer Fläche von 15 cm² gefügt. Die Belastung der Verbindung erfolgt längs der Bandrichtung.



Maximale Kraft pro Flächeneinheit (25 Versuche, 23 °C Raumtemperatur, Fügefläche 15 cm²)

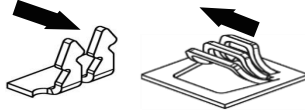
Einspannung	N/cm ²			
	Min.	Ø	Max.	σ
Scherzug 0° gegen Aufstellrichtung der Ösen	71	97	120	15 %
Scherzug 0° in Aufstellrichtung der Ösen	80	121	149	17 %

Die Werte sind gültig für eine Fügefläche von mindestens 15 cm².

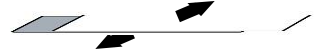
Applikationswerte der Verbindung

Prüfaufbau

Im Scherzug erfolgt eine Belastung gegen die Aufstellrichtung der Haken und quer zur Bandrichtung. Der Winkel, unter dem die Klettverbindung gelöst wird, ist einstellbar:




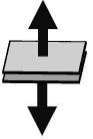
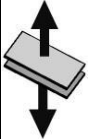

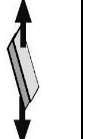

Belastungsrichtung im Scherzug



Probe

Die Messwerte geben Auskunft über die Änderung der maximalen Kraft pro Flächeneinheit in Abhängigkeit von den verschiedenen Belastungsarten* und Temperaturen** (10 Versuche, Fügefläche 6,6 cm²).

Die Krafteinleitung erfolgt im Scherzug quer zur Bandlaufrichtung.

					
Schälzug	Kopfzug	Scherzug			
	90°	60°	45°	30°	0°

Einspannung		N/cm ²							
		23 °C				50 °C			
		Ø		σ		Ø		σ	
Kopfzug	Min.	5	9	Max.	35	Min.	7	Max.	37
					%				%
Scherzug 0°		28	41	50	19	22	40	60	23
					%				%
Scherzug 30°		17	26	32	17	17	26	31	15
					%				%
Scherzug 45°		13	19	23	17	10	19	33	38
					%				%
Scherzug 60°		6	10	18	34	5	10	23	53
					%				%
Schälzug		1	3	8	91	1	2	5	68
					%				%

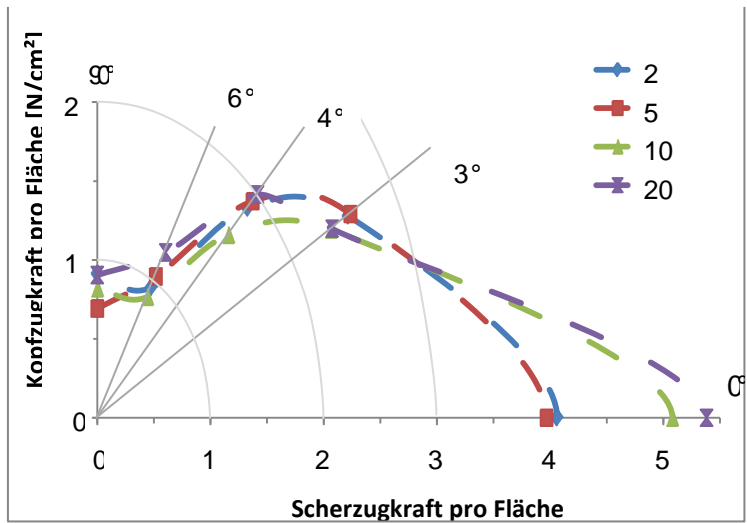
Einspannung		N/cm ²							
		100°C				200°C			
		Ø		σ		Ø		σ	
Kopfzug	Min.	5	8	Max.	34	Min.	9	Max.	33
					%				%
Scherzug 0°		32	51	65	24	29	54	62	24
					%				%
Scherzug 30°		17	24	37	28	18	24	29	28
					%				%
Scherzug 45°		11	16	21	20	18	20	22	20
					%				%
Scherzug 60°		5	9	13	34	9	12	16	34
					%				%
Schälzug		2	3	5	35	1	4	10	35
					%				%

Einspannung		N/cm ²							
		400 °C				600 °C		800 °C	
		Min	Ø	Mz	σ	Min	Ø	Mz	σ
Scherzug 0°		1	59	96	43	4	55	75	24
		7			%	2			%
								2	30
								5	
								35	13
									%

*: Prüfvorschrift: LWF KS-2-Probe, Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn

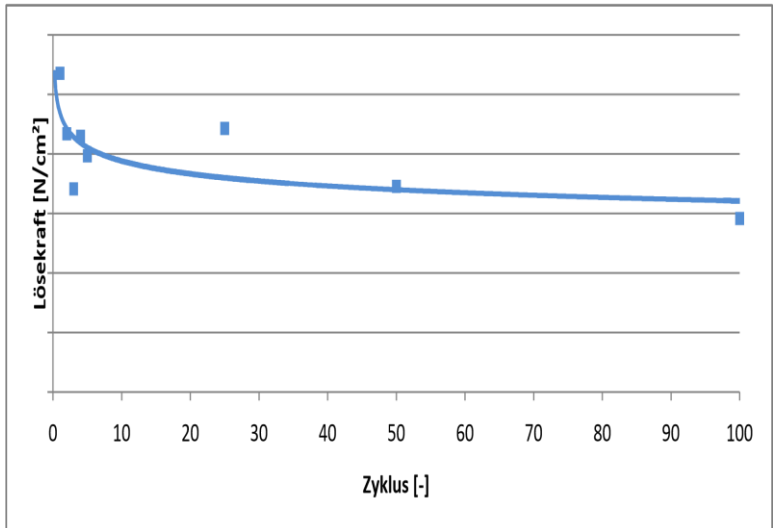
** : Auf Grund des Prüfaufbaus ab 400 °C nur im Scherzug messbar

Kraft pro Fläche in Abhängigkeit des Einleitungswinkels



Polardiagramm - Mittelwerte aus 10 Versuchen, abhängig von Belastungswinkel und Temperatur

Entwicklung der Lösekraft pro Fläche bei mehrmaligem Fügen und Lösen



Abfall der Verbindungsfestigkeit bei einhundertmaligem Fügen und Lösen per Hand, Mittelwerte aus 10 Versuchen bei 23 °C Raumtemperatur und Trendlinie

Der Abfall der Lösekraft betrug im Versuch nach einhundertmaligem Lösen im Mittel ca. 45 %.

Chemische und thermische Beständigkeit

Gemäß DIN 10088,

Werkstoff: 1.4310


Befestigung

Vorzugsweise Schweißen oder Nieten

Weitere Möglichkeiten vom jeweiligen Einsatzzweck abhängig;
obliegen dem Anwender

[illegible]

8.3 Kohlenstofffasern

	Technisches Datenblatt	Revision 01/2010
		Seite: 1 von 1

Produktkennung

Artikelnummer	HP-U500C
Aufbau	0°
Bezeichnung	Unidirektional-Carbon-Gelege

Technische Spezifikation

Konstruktion	Flächengewicht [g/m²]	Toleranz [± %]	Material
0°	500	5	Carbon 50K
-45°		5	
90°	9,2	10	Glasfaser
+45°		5	
CSM		5	
Nähfaden	6,5	10	PES
Gesamtflächengewicht	516	5	g/m²
Nähbindung			Tricot

Aufmachung

Länge	50	l/m	±1%
Breite	123	cm	± 2%

Verpackung

Hülsendurchmesser	76	mm	innen
Folie	LDPE	transparent	

HP-Textiles, D- 48480 Schapen
 Tel: 0049 (0) 5905 - 94598-70
 Fax: 0049 (0) 5905 - 94598-74
info@hp-textiles.com
www.hp-textiles.com

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.

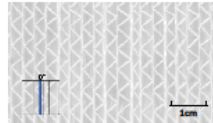
8.4 Glasfasern

Technisches Datenblatt
 technical data sheet
HP-U600E



Produktkennung / product identification

Artikelnummer article number	HP-U600E
Bezeichnung name	Unidirektional Glas Gelege unidirectional glass fabric
Faserausrichtung fibre orientation	0°



Technische Spezifikation / technical specification

Konstruktion construction	Flächengewicht areal weight	Toleranz tolerance	Material material	
	[g/m²]	[± %]		
0°	608	5	E-Glas e-glass	
-45°		5		
90°	40	5	E-Glas e-glass	
+45°		5		
Nähfaden / stitching	15	5	PES	
Gesamtflächengewicht total areal weight	663	5	g/m²	
Nähbindung stitch type	Trikot tricot			
Nähfeinheit stitch gauge	10			

Aufmachung / dimensions

Länge / length	40	lftm / lm	± 2%	
Breite / width	127	cm	± 2%	

*Abweichende Breiten auf Anfrage möglich / customized widths on request are available

Vernackung / packaging

Hülsemdurchmesser tube diameter	76 / 152	mm	innen inside	
Folie / foil	LDPE	transparent		

Die Angaben in diesem Produktdatenblatt wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen unserem derzeitigen Erkenntnisstand. Eine Verbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden.
 All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required.

8.5 Harzsystem



Technische Information
Epoxy and Phenolic Resins Division
Epoxy Resins

2.1- 1

Infusionsharz MGS® RIMR 135

Härter MGS® RIMH 134 - RIMH 137

	Seite	Überblick
Kurzcharakteristik	1	
Anwendung	2	
Spezifikationen	3	
Verarbeitungskennwerte	4	
Mischungsverhältnisse	4	
Temperaturanstieg	5	
Viskosität	6	
T _g Anstieg	7	
DMA	7	
Mechanische Kennwerte	8	

Zulassung	Germanischer Lloyd	
Einsatz-gebiete	spezielles Harz für Pultrusion und Injektionsverfahren (RTM, SCRIMP/VARI) Rotorblätter für Windenergieanlagen, Boots- und Schiffsbau, Sportgeräte, Formen- und Vorrichtungsbau	
Einsatz-temperaturen	-60 °C bis +50 °C -60 °C bis +80 °C	ohne Temperung nachTemperung
Verarbeitung	bei Temperaturen zwischen 10 °C und 50 °C, wegen der sehr niedrigen Viskosität speziell für Injektionsverfahren und Pultrusion geeignet	
Besondere Merkmale	sehr niedrige Mischviskosität, gute Anhängert bei Raumtemperatur, Topfzeitbereich von ca. 30 min bis 3,5 h, kurze Härtingszeiten bei höheren Temperaturen	
Lagerung	in original verschlossenen Gebinden 24 Monate bei Raumtemperatur haltbar	

Kurz-
charakteristik

8.6 Faservolumengehalt

Tabelle 5: Faservolumengehalt, Kalkulation

Wasserdichte $\rho(f)$ (24,2°C):				0,99727 g/cm³		Faserdichte $\rho(f)$:				1,8 g/cm³	
3PB C0/90 Sand											
Dichteberchnung (FVG						
Probe	W(a)	W(f)	G	Dichte $\rho(c)$	Probe (m1)	Tiegel leer (m2)	Tiegel+Fasern (m3)	Fasermasseanteil W(f)	Faservolumenanteil V(f)		
	in g	in g	in g	in g/cm³	in g	in g	in g	in %	in %		
1	0,8527	0,5982	0,2545	1,42047	0,6779	29,9161	30,3066	57,60	45,76		
2	0,8390	0,5920	0,2470	1,41962	0,7050	30,3398	30,8051	66,00	52,43		
3	0,8624	0,6106	0,2518	1,4495	0,7018	30,4457	30,8422	56,50	44,88		
			Mittelwert:	1,42986333				Mittelwert	47,69		
3PB C+45 Sand											
Dichteberchnung					FVG						
Probe	W(a) = m1	W(f)	G	Dichte $\rho(c)$	Probe (m1)	Tiegel leer (m2)	Tiegel+Fasern (m3)	Fasermasseanteil W(f)	Faservolumenanteil V(f)		
	in g	in g	in g	in g/cm³	in g	in g	in g	in %	in %		
1	0,7633	0,5257	0,2376	3,20166088	0,7633	29,5382	29,9909	59,31	47,11		
2	0,7475	0,5185	0,2290	3,25311669	0,7475	29,2228	29,6592	58,38	46,38		
3	0,6874	0,4788	0,2086	3,28410957	0,6874	29,4074	29,7694	52,66	41,83		
			Mittelwert:	3,24629571				Mittelwert	45,11		

8.7 Vermessung einer Struktur

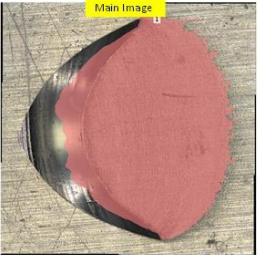
KEYENCE

Your expert: Sebastian Winterfeldt
Phone: +49 162 251 6467
www.keyence.de

Volume & area measurement

06.12.2019 10:14:18

Measurement
equipment:
VK-X Series



Acquisition parameters:

Oberflächenprofil
5x
Standard

Analysis condition

Messmodus	Konvex
Höhenschwellenwert	-96,279µm
Kleine Bereiche ignorieren	10000Pixel
Ob/UnGrFI in Ofimes einbez	AUS

	Volumen µm³	Quers.Fl. µm²	Oberfläche µm²	Oberfl./QSFäch %	Fl.-Verhält. %	Durchs.Höh µm	Maximalthöhe µm	Umfang µm	Horiz. Durchm. µm	Vert. Durchm. µm	Durchm. Kreisäquiv. µm
Summe	3272580514,100	12912331,860	15741537,794	1,219	43,702	253,446	818,412	25871,964	3779,573	5087,680	4054,688
Max.	3272580514,100	12912331,860	15741537,794	1,219	43,702	253,446	818,412	25871,964	3779,573	5087,680	4054,688
Min.	3272580514,100	12912331,860	15741537,794	1,219	43,702	253,446	818,412	25871,964	3779,573	5087,680	4054,688
Durchs.	3272580514,100	12912331,860	15741537,794	1,219	43,702	253,446	818,412	25871,964	3779,573	5087,680	4054,688
Std.Abw.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3 Sigma	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	3272580514,100	12912331,860	15741537,794	1,219	43,702	253,446	818,412	25871,964	3779,573	5087,680	4054,688

S(UD)		T,SiG		Q(UD) = 1 / S(UD)		T,SiG, transponiert		Q(UD)		1/p ² [k] - z[k-1] ²		A(k)		B(k)		D(k)					
[1/MPa]	[1/MPa]	[1/MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[mm]										
1.245E-05	-2.240E-06	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	1.000E+00	80439	483	0	5.000E-01	5.000E-01	-5.000E-01	0.500	10545	10477	-9720	-7909	-7858	7290	6151	6112	-5670
-2.240E-06	3.731E-04	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	-1.000E+00	483	2683	0	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	-0.375	20954	21094	-19439	-19439	20954	21094	-19439	-19439	20954
0.000E+00	0.000E+00	1.471E-02	-5.000E-01	5.000E-01	0.000E+00	0	0	68	1.000E+00	-1.000E+00	0.000E+00	0.292	-9720	-9720	10269	7290	7290	-7702	-5670	-5670	5991
1.245E-05	-2.240E-06	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	-1.000E+00	80439	483	0	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	0.500	10545	10477	9720	-2636	-2619	-2430	879	873	810
-2.240E-06	3.731E-04	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	1.000E+00	483	2683	0	5.000E-01	5.000E-01	-5.000E-01	-0.125	20954	21094	9720	-2619	-2636	-2430	873	879	810
0.000E+00	0.000E+00	1.471E-02	-5.000E-01	5.000E-01	0.000E+00	0	0	68	-1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.042	9720	9720	10269	-2430	-2430	-2567	810	810	856
1.245E-05	-2.240E-06	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	-1.000E+00	80439	483	0	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	0.500	10545	10477	9720	2636	2619	2430	879	873	810
-2.240E-06	3.731E-04	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	1.000E+00	483	2683	0	5.000E-01	5.000E-01	-5.000E-01	0.125	20954	21094	9720	2619	2636	2430	873	879	810
0.000E+00	0.000E+00	1.471E-02	-5.000E-01	5.000E-01	0.000E+00	0	0	68	-1.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.042	9720	9720	10269	2430	2430	2567	810	810	856
1.245E-05	-2.240E-06	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	1.000E+00	80439	483	0	5.000E-01	5.000E-01	-5.000E-01	0.500	10545	10477	-9720	7909	7858	-7290	6151	6112	-5670
-2.240E-06	3.731E-04	0.000E+00	5.000E-01	5.000E-01	-1.000E+00	483	2683	0	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	-0.375	20954	21094	-19439	-19439	20954	21094	-19439	-19439	20954
0.000E+00	0.000E+00	1.471E-02	-5.000E-01	5.000E-01	0.000E+00	0	0	68	1.000E+00	-1.000E+00	0.000E+00	0.292	-9720	-9720	10269	-7290	-7290	7702	-5670	-5670	5991
2.703E-05	-8.108E-06	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	37922	3075	0	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8.108E-06	1.000E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	3075	10249	0	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.000E+00	0.000E+00	2.857E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0	0	3500	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.703E-05	-8.108E-06	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	37922	3075	0	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8.108E-06	1.000E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	3075	10249	0	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.000E+00	0.000E+00	2.857E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0	0	3500	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.703E-05	-8.108E-06	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	37922	3075	0	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8.108E-06	1.000E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	3075	10249	0	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.000E+00	0.000E+00	2.857E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0	0	3500	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.703E-05	-8.108E-06	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	37734	2448	0	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8.108E-06	1.250E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	2448	8159	0	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.000E+00	0.000E+00	2.857E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0	0	3500	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A			B			D		
42180	41908	0	0	0	0	14060	13969	-9720
41908	42180	0	0	0	0	13969	14060	-9720
0	0	41078	0	0	0	-9720	-9720	13693

A	B
B	D

=

42180	41908	0	0	0	0
41908	42180	0	0	0	0
0	0	41078	0	0	0
0	0	0	14060	13969	-9720
0	0	0	13969	14060	-9720
0	0	0	-9720	-9720	13693

Nx	Ny	Nxy	Mx	My	Mxy
[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[Nmm/mm]	[Nmm/mm]	[Nmm/mm]
142	0	0	0	0	0

LOAD:

K^{-1}

=

1,844E-03	-1,832E-03	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
-1,832E-03	1,844E-03	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
0,000E+00	0,000E+00	2,434E-05	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	5,550E-03	-5,480E-03	4,988E-05
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-5,480E-03	5,550E-03	4,988E-05
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,988E-05	4,988E-05	1,438E-04

142
0
0
0
0
0

EPS(xx)	EPS(yy)	EPS(xy)	k(xx)	k(yy)	k(xy)
[-]	[-]	[-]	[1/mm]	[1/mm]	[1/mm]
0,261874	-0,260185	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

EPS	EPS	EPS	EPS(UD)	EPS(UD)	EPS(UD)	SIG(UD)	SIG(UD)	SIG(UD)
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,261874	0,261874	0,261874	0,000844	0,000844	0,000844	68,3	68,3	68,3
-0,260185	-0,260185	-0,260185	0,000844	0,000844	0,000844	2,7	2,7	2,7
0,000000	0,000000	0,000000	0,522059	0,522059	0,522059	35,5	35,5	35,5
0,261874	0,261874	0,261874	0,000844	0,000844	0,000844	68,3	68,3	68,3
-0,260185	-0,260185	-0,260185	0,000844	0,000844	0,000844	2,7	2,7	2,7
0,000000	0,000000	0,000000	-0,522059	-0,522059	-0,522059	-35,5	-35,5	-35,5
0,261874	0,261874	0,261874	0,000844	0,000844	0,000844	68,3	68,3	68,3
-0,260185	-0,260185	-0,260185	0,000844	0,000844	0,000844	2,7	2,7	2,7
0,000000	0,000000	0,000000	-0,522059	-0,522059	-0,522059	-35,5	-35,5	-35,5
0,261874	0,261874	0,261874	0,000844	0,000844	0,000844	68,3	68,3	68,3
-0,260185	-0,260185	-0,260185	0,000844	0,000844	0,000844	2,7	2,7	2,7
0,000000	0,000000	0,000000	0,522059	0,522059	0,522059	35,5	35,5	35,5

X(t)	X(c)	Y(t)	Y(c)	S		F(11)	F(12)	F(22)	F(1)	F(2)	F(S)		RF(1FF)	RF(FF)	lrf
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		R(I)	R(II)		RF(t)	RF(c)			RF(matrix) x 1.5		
820	-530	30	-130	43		-2,301E-06	-1,214E-05	-2,564E-04	3,106E-03	4,103E-02	5,408E-04		1,01	12,00	0,991906014
						3,219E-01	6,646E-01		12,00112684	7,756825884			1,51		
820	-530	30	-130	43		-2,301E-06	-1,214E-05	-2,564E-04	3,106E-03	4,103E-02	5,408E-04		1,01	12,00	0,991906014
						3,219E-01	6,646E-01		12,00112684	7,756825884			1,51		
820	-530	30	-130	43		-2,301E-06	-1,214E-05	-2,564E-04	3,106E-03	4,103E-02	5,408E-04		1,01	12,00	0,991906014
						3,219E-01	6,646E-01		12,00112684	7,756825884			1,51		
820	-530	30	-130	43		-2,301E-06	-1,214E-05	-2,564E-04	3,106E-03	4,103E-02	5,408E-04		1,01	12,00	0,991906014
						3,219E-01	6,646E-01		12,00112684	7,756825884			1,51		

Bisher sind erschienen:

Band	Verfasser	Titel
1/01	Thorsten Anke	Bake Hardening von warmgewalzten Mehrphasenstählen
1/02	Günther Lange	Beitrag zum Umformverhalten von dreischichtigen austenitischen Sandwichverbunden mit polymerer Kernschicht
1/03	Mohamed Soliman	Phase Transformation and Mechanical Properties of New Austenite-Stabilised Bainite Steels
1/04	Alexander Mayr	Graphitausscheidungen in indefiniten Eisen-Gusswerkstoffen für Walzen
1/05	Mehdi Asadi	Influence of the Hot Rolling Process on the Mechanical Behaviour of Dual Phase Steels
1/06	Olga Sokolova	Forming behaviour of 3-layered St/Polymer/St sandwich sheets
1/07	Hendrike Harstick	Einfluss des Schmiedens auf die magnetischen Eigenschaften von Elektroblechen
1/08	Kai-Michael Rudolph	Herstellung und Einsatz aluminiumplattierter Magnesiumbleche als Halbzeug zum Tiefziehen
1/09	Jan Orend	Numerische Simulation der Gefügeentwicklung während des Warmwalzens zur Optimierung der Stichplanberechnung
1/10	Mohamed Harhash	Forming Behaviour of Multilayer Metal/Polymer/Metal Systems
1/11	Farzad Foadian	Precision Tube Production Influencing the Eccentricity, Residual Stresses and Texture developments: Experiments and Multiscale Simulation
2/01	Iman M.A. Taha	Discontinuous Natural Fibres and Their Polymer Composites
2/02	Florian Klunker	Aspekte zur Modellierung und Simulation des Vacuum Assisted Resin Infusion
2/03	Marcus Tekampe	Beitrag zur Anwendbarkeit von Managementmethoden an einem Forschungsinstitut aus dem Bereich der Kunststofftechnik
2/04	Stefan Kirchberg	Einfluss von Füllgrad und Geometrie weichmagnetischer Partikel auf die Verarbeitungs- und Materialeigenschaften ausgewählter Thermoplaste
2/05	Lena Ebba Josch	Langzeitverhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen am Beispiel von Losflanschen
2/06	Lei Xie	Study on relevant factors influencing the strength of weld line defect in micro injection molding process
2/07	Maximilian P. Müller	Wissensbasierten Methodik zur Ermittlung des stückzahl optimalen Werkzeug- und Fertigungskonzeptes

- 2/08 **Janina Reimers** Untersuchungen zum Einfluss von Feuchtigkeitsaufnahme von Epoxid-harzkomponenten und deren Auswirkung auf den Verarbeitungsprozess und ausgehärtete Produkte
- 2/09 **Wangquing Wu** Simultaneous Binding and Toughening Concept for an Efficient and Qualified Manufacturing of Textile Reinforced pCBT Composites
- 2/10 **Markus Topp** Zellulose als multifunktionaler Bestandteil in Polymerkompositen – Potenzialanalyse und Umsetzung der Verarbeitung von intrinsisch leitfähigen Polymeren über zelluloseverstärktes Polypropylen
- 2/11 **Nina Graupner** Analyse und Optimierung der Struktur- und Eigenschaftsbeziehungen von zellulosefaserverstärkten Polylactid-Verbundwerkstoffen
- 2/12 **Saullo P.G. Castro** Semi-Analytical Tools for the Analysis of Laminated Composite Cylindrical and Conical Imperfect Shells Under Various Loading and Boundary Conditions
- 2/13 **Tobias Koplin** Untersuchung der einflussgebenden Parameter bei der Compoundierung von zellulosefaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen mittels eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders

Band X / yy

- X: 1 Werkstoffumformung
 2 Polymerwerkstoffe und Werkstofftechnik
 3 Werkstoffkunde und Werkstofftechnik
 9 Allgemeine Veröffentlichungen

yy: fortlaufende Nummer

ISBN x-xxx-x-x